INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA MAQUINARIA INTERNA DEL SOL

EL PROBLEMA DE LA OBESIDAD

MAS VELOZ QUE LA LUZ

ARENAS DEL MUNDO



OCTUBRE 1996
800 PTAS.




Octubre de 1996 Número 241

SECCIONES



Portada: Laurie Grace. Fotografía de Christopher Burke, Quesada/Burke Studios

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Erik S. Lesser; Beth Phillips (*arriba, derecha*)
6-7	Michael Goodman (*arriba*); Mondex (*abajo*)
8	Lisa Burnett
9	Michael Goodman
12-13	IBM Research y Observatorio Astrofísico Smithsoniano
14-15	(*arriba*) Observatorio Solar Nacional/Sacramento Peak; Observatorio Nacional de Astronomía (*inserto*); (*abajo*) NOAA; Peter Samek, *Slim Films* (*gráfica*); Observatorio de París
16-17	Peter Samek, *Slim Films*
18	Observatorio Monte Wilson HK Project; Peter Samek, *Slim Films*
20	Cortesía de Christiane Nüsslein-Volhard
21	Jeremy Burgess *Science Photo Library, Photo Researchers, Inc.*; Christiane Nüsslein-Volhard (*inserto*)
22-26	Christiane Nüsslein-Volhard (*fotografías*), Laurie Grace (*dibujos*)
42-43	Andrew Paul Leonard *APL Microscopic*; manipulación digital de Laurie Grace (*foto del fondo*); Walter N. Mack
44-47	Walter N. Mack; Dan Wagner (*fotografías inferiores*); Peter Yates *SABA* (*foto del autor*)
48	Clifford A. Pickover, IBM Research
49	IBM Research
50	John R. Kirtley
51	Jared Schneidman Design (*arriba*); Clifford A. Pickover, IBM Research (*abajo*)
52-53	Jared Schneidman Design
54-55	Quesada Burke Studios
56-59	Bert Van Den Brouke; Jared Schneidman Design (*gráfica*)
63-69	Rolf Tarrach
70-71	Cortesía de Lucy D. Lustig-Curtis
73	Jana Brenning (*arriba*); John Annerino (*abajo*)
75	Lunar Corporation
76	Laboratorio Jackson
84	Bryan Christie
85	Johnny Johnson
87-89	Johnny Johnson
96	Liberty Belle Books (*arriba*); Tomo Narashima (*izquierda*); Laurie Grace (*derecha*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Tarjetas versátiles*, *Arenas del mundo*, *De cerca* y *Juegos matemáticos*; Mónica Murphy: *La dinamo estelar*; Ernesto Sánchez-Herrero: *Gradientes organizadores del desarrollo del embrión*; Juan Pedro Campos: *Superconductividad a altas temperaturas*; Eugenio Portela: *Los secretos de la cerveza de alambique*; Esteban Santiago: *La obesidad*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*

Ciencia y sociedad: Manuel Puigcerver

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Scientific American: «En la generación de electricidad, el precio del combustible es una cifra tan baja en comparación con los gastos globales que las centrales nucleares, según una estimación reciente de Westinghouse, reducirían en muy poco las facturas de la electricidad doméstica. Las inversiones que requieren las centrales generadoras y distribuidoras, y el mantenimiento de las instalaciones, son muchísimo más elevadas que la cuenta de combustible.»

«Para conseguir una medida rápida y exacta del modo en que los materiales se comportan al formar parte de un sistema unitario, se están utilizando algunos dispositivos insólitos. La puerta de una nevera, por ejemplo, puede que tenga un aspecto agradable y funcionar perfectamente varias veces, pero ello no asegura que funcione satisfactoriamente durante muchos años. Por tanto, en vez de esperar a que un ama de casa esté abriendo y cerrando la nevera hasta morir, se ha construido una máquina que ejecuta esa operación sin parar veinticuatro horas al día hasta que se avería. Así, merced a este robot cierrapuertas, se consigue reducir a 12 días el equivalente a 15 años de la vida útil de una puerta.»

«“Profesor, no veo la pizarra”, era una queja habitual en el colegio Bowditch, de Salem (Massachusetts), antes de que el aula n.º 4 pasara a convertirse en objeto de un experimento sobre iluminación de aulas escolares. Elementos clave para mejorar la visión son unas lámparas fluorescentes triangulares que producen una distribución asimétrica de la luz, con la máxima iluminación dirigida hacia la pizarra. Cuando las lamas de las ventanas no bastan para controlar el resplandor del firmamento, las lámpara fluorescentes son encendidas y apagadas por un “monitor”, quien no es sino uno de los alumnos que actúa según las indicaciones de un luxímetro montado en su pupitre.»

...cien años

Scientific American: «El ciclismo, hasta ayer afición de unos pocos, es hoy un pasatiempo de la mayoría. Pero ese progreso ha ido acompañado de incontables víctimas. En cuanto alcanza la cresta de un monte, el ciclista imprudente parece sentirse impulsado a levantar los pies de los pedales y dejar que la máquina descienda ladera abajo con toda la rapidez que le permita la gravedad. Un buen freno instalado sobre la rueda trasera reduciría el número de accidentes debidos a esta causa, pero existe la idea desafortunada de que un freno añade un peso incómodo a la máquina.»

«*Leydenia gemmipara* Schaudinn es el nombre dado a un rizópodo ameboideo parasitario que los sabios berlineses acaban de descubrir en un fluido extraído a enfermos de cáncer de estómago y del que creen ser la causa de la enfermedad.»

«Una nueva variedad de vidrio de ventana, invento de Richard Szigmondy, de Viena, posee la peculiar virtud de que no conduce los rayos térmicos. Una hoja de este vidrio de 6,5 mm de grueso absorbe el 87 por ciento del calor que incide en él, en contraste con el vidrio cilindrado común que absorbe sólo alrededor del cinco por ciento. Si el vidrio de Szgmondy es opaco a los rayos térmicos, será capaz de mantener fresca una casa durante el verano y tenderá a hacerla más cálida en el invierno.»

...ciento cincuenta años

Scientific American: «El magnetismo con sus pretendidas ventajas de insensibilizar a las personas frente al dolor es probable que sea sustituido por un descubrimiento del doctor William T. G. Morton, de Boston. Se trata sencillamente de un gas o vapor, que inhalado en una pequeña cantidad, torna inconsciente en el acto al paciente, haciendo a éste insensible al dolor, brindando así oportunidad para ejecutar sin incomodidad las más difíciles y por demás dolorosas operaciones quirúrgicas.»

«Jean Baptiste Fourier estableció que hay tres estados en que existen los cuerpos materiales y demostró que cuando un sólido o un líquido (como el hierro fundido) se pone incandescente, la luz que emite está polarizada, y que la luz de los gases incandescentes no está polarizada. Ahora M. François Arago, con sagacidad, ha establecido que la luz solar no está polarizada, con la inevitable conclusión de que la superficie del astro se halla cubierta de una atmósfera de llamas.» [*N. de la R.: El plasma, cuarto estado de la materia, no se descubrió hasta 1952. Desde luego que la superficie solar desprende luz no polarizada pero en realidad está compuesta de plasma.*]

«Nuestro grabado representa un invento reciente, el Escudo contra el Fuego, cuyo objeto es proteger a los bomberos del excesivo calor de las llamas mientras actúan en su valiente profesión. La cabeza es más sensible al calor que cualquier otra parte del cuerpo, muchas veces obligando a los bomberos a mantenerse apartados, cuando, si pudieran protegerse los rostros, podrían acercarse mucho más a las llamas con el posible resultado de salvar bienes valiosos. A tal fin se ha construido una máscara de piel dura, provista de piezas de mica traslúcida a modo de gafas y un pequeño tubo contiguo a la boca para respirar.»



Escudo contra el Fuego

Tarjetas versátiles

Al aumentar el número de sus posibles aplicaciones, estos ordenadores de billetero se están abriendo paso sin llamar la atención

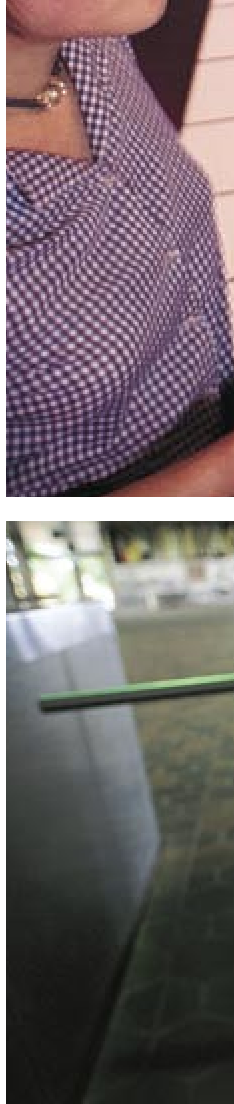
Carol H. Fancher

Tanto ha avanzado la revolución de los semiconductores que la potencia de cómputo que en tiempos ocupaba una sala entera puede ahora quedar perdida en el fondo del bolsillo, entre la calderilla, las llaves de la casa o los envoltorios de caramelos. Desde hace más de 10 años se vienen utilizando en Europa tarjetas de crédito versátiles (llamadas "inteligentes" por abuso del lenguaje), dotadas de microcircuitos diminutos. Un juego de contactos normalizados, implantados en el anverso de la tar-









1. EN ATLANTA tuvo lugar el ensayo a gran escala de tarjetas versátiles. Se vendieron más de un millón durante los Juegos Olímpicos. Las tarjetas se utilizaron para acceder a las instalaciones olímpicas y los restaurantes y tiendas de

jeta, suplementa o reemplaza la banda magnética codificada habitual en el reverso. No han faltado quienes opinasen que las tarjetas versátiles son una técnica en interminable búsqueda de aplicaciones de interés, pero las experiencias de varios países, distintas y divergentes, hacen ver que las cosas revisten mayor complejidad.

Resulta curioso que la política de telecomunicaciones haya venido siendo uno de los elementos decisivos en la difusión de las tarjetas versátiles. En los Estados Unidos, donde las llamadas telefónicas son baratas y la conexión a la red de equipos lectores de banda magnética es sencilla, la capacidad de las tarjetas versátiles para evitar defraudaciones no compensa necesariamente su más elevado costo. Los comerciantes, para verificar la validez de una tarjeta antes de cerrar una transacción, pueden consultar telefónicamente una base de datos centralizada. En Europa, donde las llamadas son, por lo general, más caras y la conexión a la línea telefónica de equipos dotados de módem es más difícil, la seguridad que aportan las tarjetas versátiles ha supuesto una importante fuerza motriz, que ha impulsado su introducción.





toda la ciudad. También los accesos al suburbano aceptaban las tarjetas.

Gracias a las tarjetas versátiles los comerciantes no tienen necesidad de consultar "en línea" bases de datos centralizadas. Pueden confiar en números de identificación personal (PIN) para verificar la titularidad de una tarjeta: basta confrontar el número tecleado por el cliente con el registrado en la propia tarjeta. Los microcircuitos, por otra parte, son menos susceptibles de manipulación que las bandas magnéticas, cuya lectura y regrabación puede realizarse con equipos disponibles fácilmente.

Entre los motivos para introducir las tarjetas versátiles se cuenta la posibilidad de dar a una misma tarjeta una multitud de usos. En teoría, bastaría un solo rectángulo de plástico provisto de un microcircuito de silicio para proporcionar un documento de identidad personal, servir de tarjeta de crédito, de pase de acceso, ser portador de datos médicos esenciales y para reemplazar al dinero en efectivo en transacciones de poco importe. Otras posibles aplicaciones de las tarjetas versátiles dependen de la imaginación de los proveedores y de la aceptación de los consumidores. Al mismo tiempo que una misma tarjeta vaya incorporando más elementos de la vida de una persona se hará preciso encarar los problemas de seguridad y de respeto a la intimidad.

El atractivo de las tarjetas versátiles aumenta parejamente a la reducción de los precios de las capacidades de proceso y de almacenamiento de los microcircuitos. Las tarjetas versátiles tienen dos ventajas sobre las de banda magnética. En primer lugar, pueden contener de 10 a 100 veces más información y conservarla mejor. En segundo, las tarjetas versátiles pueden, en conjunción con un terminal, ejecutar



2. LAS TARJETAS VERSATILES están dotadas de memoria y de un microprocesador alojado bajo los contactos dorados. La posición de los contactos está normalizada, a fin de que tarjetas y equipos de lectura de muy diversas procedencias puedan operar conjuntamente.

tareas complejas. Pueden, por ejemplo, entablar con el terminal una serie de preguntas y respuestas que verifiquen la validez de la información contenida en la tarjeta y que certifiquen además la identidad del terminal de lectura. Una tarjeta que utilizase un algoritmo de este tipo podría convencer a un terminal local de que el titular dispone de fondos suficientes para abonar el importe de una transacción sin revelar ni el saldo ni el número de su cuenta bancaria. Según la importancia de la información de que se trate, la seguridad podría basarse en un simple número de identificación personal (PIN) como el utilizado por los cajeros automáticos, en un sistema de encriptación de nivel medio, como el DES (sigla de "Data Encryption Standard", estándar de encriptación de datos) o en un sistema criptográfico de alta seguridad, como los llamados de clave pública.

Introducidas en Europa a finales de los años setenta, se han producido ya más de 250 millones de tarjetas versátiles. La inmensa mayoría de los microcircuitos fabricados han ido a parar a tarjetas telefónicas de antepago, desechables, pero aun así, la

experiencia adquirida ha reducido los costos de manufactura, ha mejorado su fiabilidad y ha demostrado la viabilidad de las tarjetas. Está muy avanzada la elaboración de normas nacionales e internacionales que garanticen que las tarjetas (con sus programas para las muchas aplicaciones diferentes que puedan residir en ellas) y los terminales funcionen conjunta, segura e impecablemente. Así, por ejemplo, las normas establecidas por la Organización Internacional de Normalización, ISO, regulan la disposición de los contactos del anverso de las tarjetas versátiles, al objeto de que cualquier tarjeta y cualquier equipo lector puedan establecer conexión.

Se están desarrollando normas específicas para la utilización de tarjetas versátiles en telefonía celular digital, televisión por satélite o por cable y, obviamente, en las operaciones financieras. Visa, Mastercard y Europay han acordado normas comunes para las tarjetas versátiles, que definen los protocolos básicos de comunicación entre las tarjetas y los equipos de lectura (similares a las normas RS-232 que regulan la comunicación entre ordenadores personales y módem). Las normas son de la generalidad suficiente como para que los equipos y los programas que se atengan a ellas puedan intercambiarse casi cualquier tipo de información. En consecuencia, fruto de este acuerdo podría ser que bastase una sola tarjeta para hacer compras, retirar dinero de los cajeros automáticos, efectuar las bonificaciones a los pasajeros frecuentes de las líneas aéreas o acceder a Internet.

Aunque las normas dictan la forma de las tarjetas y los contactos eléctricos, la técnica que alberga su interior ha experimentado una evolución importante. Las tarjetas “con memoria” más sencillas contienen sólo memoria no volátil y un reducido número de circuitos lógicos destinados a seguridad y control. Su aplicación más típica son las tarjetas telefónicas de pago por anticipado. Un terminal situado en el teléfono público va inscribiendo un saldo decreciente en la memoria de la tarjeta conforme se va acumulando el importe de las llamadas. Agotado el saldo, la tarjeta se desecha.

CAROL H. FANCHER lleva cuatro años en Motorola trabajando en la definición y desarrollo del mercado de tarjetas versátiles. Antes había desempeñado funciones relacionadas con la ingeniería eléctrica, su especialidad, en Tracor, Ford Microelectronics y el Instituto Fraunhofer de Cicuitos Integrados de Erlangen.



3. LAS TARJETAS DE EFECTIVO son equivalentes electrónicos del cheque de viaje. Pueden servir para abonar el importe de una comida rápida o el estacionamiento. Los consumidores adquieren en un expendedor tarjetas cargadas con un contravalor monetario, que utilizan después para transacciones al contado de

Las tarjetas versátiles son más elaboradas; están provistas de un microcircuito dotado de unidad central de proceso, así como diversas clases de células de memoria de corta o de larga duración. Ciertos prototipos incorporan también un circuito coprocesador especializado en operaciones criptográficas, sea para acelerar las tareas de codificación y descodificación de mensajes, sea para la generación de firmas digitales que certifiquen la información transferida. Las normas sobre tarjetas versátiles no establecen límites a la capacidad de procesamiento de la tarjeta en tanto los microcircuitos necesarios puedan quedar alojados en el espacio reservado bajo las pistas de contacto.

El costo de las tarjetas versátiles actuales, producidas por Giesecke & Devrient, Gemplus, Schlumberger, Solaic u otras empresas del sector, va desde unas 100 pesetas a unas 3000. [Los microcircuitos de su interior los fabrican Motorola, Siemens, SGS-Thompson y otras compañías.] Una tarjeta de banda magnética puede costar entre 10 y 50 pesetas, dependiendo de que la tarjeta lleve o no una fotografía o grabación holográfica, así como del número de las producidas en cada tirada.

Dado que las tarjetas dependen de una fuente de alimentación externa, proporcionada por la interfase del equipo de lectura, toda la información almacenada en memoria de acceso aleatorio (RAM) se perdería al retirar la tarjeta del lector. Por ello, los microprocesadores para tarjetas versátiles utilizan sólo algunos centenares de octetos de memoria volátil, que sirven de bloc de notas donde trabajar en las transacciones. En cambio, los programas que controlan las operaciones de la tarjeta han de sobrevivir de una utilización a otra, por lo que ocupan entre 3 y 20 kiloctetos de memoria de sólo lectura, no volátil (ROM). El contenido de esta memoria permanente queda establecido en la fabricación del microcircuito. Los datos personales, económicos o médicos residen en una memoria alterable pero no volátil (EEPROM, memoria borrable y programable eléctricamente, sólo de lectura) cuya capacidad puede variar desde 1 a 16 kiloctetos.

El imperativo de seguridad pesa en el diseño y manejo de la tarjeta, en los circuitos de que va dotada y en los programas incorporados en







pequeño importe. Los lectores de tarjetas transfieren periódicamente información a los bancos, acreditando las cantidades en la cuenta del vendedor, bien directamente o a través de una caja de compensación. Las tarjetas más evolucionadas son recargables; las más sencillas, agotado el saldo, se desechan sin más.

ella. Los procesadores están específicamente diseñados para restringir el acceso a la información que las tarjetas contienen y para impedir que éstas sean utilizadas por personas no autorizadas.

Los delincuentes, por ejemplo, podrían tratar de forzar la tarjeta, haciéndola funcionar con tensiones eléctricas o frecuencias de reloj distintas de las previstas, con la esperanza de descubrir en ella puntos vulnerables de los que sacar partido. Un dispositivo bien diseñado habría automáticamente de dejar de responder en situaciones así. En ciertos casos, cabe diseñar los enlaces entre circuitos de modo que aquéllos queden inoperables tras la programación de la tarjeta, haciendo imposible la modificación de datos esenciales. Los fabricantes pueden también utilizar técnicas especiales de resistencia a manipulaciones que impidan a los ladrones lograr un acceso directo a los microcircuitos.

Aunque la mayoría de las tarjetas versátiles requieren contacto físico entre la tarjeta y las escobillas del lector, existe un número creciente de aplicaciones basadas en las llamadas tarjetas sin contacto. Las de corto alcance operan por acoplamiento capacitivo o inductivo entre el dispositivo lector y la tarjeta, con separaciones del orden de un milímetro; las de gran alcance se comunican mediante señales de radio. (La energía de radiofrecuencia emitida por el lector ha de alimentar la tarjeta, cuyo consumo eléctrico tiene que ser, por tanto, de una parquedad extrema.) Las tarjetas versátiles sin contacto suelen utilizarse en situaciones que exigen un procesamiento muy rápido, como es el caso de los controles de acceso a lugares muy concurridos. Los operadores de sistemas de tránsito de Hong Kong, de Washington capital, de Manchester y de una docena más de otras ciudades han ensayado las tarjetas sin contacto; Hong Kong emitirá alrededor de tres millones de tarjetas en 1997.

Los industriales y los usuarios están colaborando al objeto de poner a punto estándares duraderos para tarjetas de largo alcance sin contacto. También se están esforzando en normalizar tarjetas híbridas capaces de comunicarse tanto directamente como por radioenlaces. La compañía aérea Lufthansa ha comenzado ya a entregar una tarjeta híbrida a sus clientes habituales; la parte sin contacto sirve de tarjeta de identidad para su sistema de pasajes sin billete ni tarjeta de embarque y los contactos la convierten en una tarjeta de crédito inteligente acorde con las normas europeas. A finales de este año habrá en circulación unas 350.000 tarjetas de este tipo.

La tarjeta versátil es, por derecho propio, un gran logro técnico; constituye, sin embargo, la parte más identificable de un vasto sistema de transacciones que la rodea. Las peculiaridades de esta infraestructura pueden tener mucha más influencia en la evolución del papel de la tarjeta en la sociedad que las características de la tarjeta propiamente dicha.

Tomemos, por ejemplo, la tarjeta depositaria de efectivo, que constituye en el presente la aplicación más extendida de la combinación de tarjeta con microcircuito. Nace su atractivo de los elevados gastos generales de otras opciones, como las tarjetas de crédito o el dinero en billetes o monedas. Mientras el importe de la transacción sea bajo, los costos de verificación resultarán excesivos para consentir ganancia alguna si el pago se efectúa con tarjetas ordinarias. La tarjeta de efectivo minimiza el



4. EN SWINDON, una ciudad inglesa, se está ensayando el Mondex, un sistema de “monedero electrónico” en el que tarjetas versátiles intercambian dinero digital. A diferencia de la mayoría de otros sistemas de valor depositado, Mondex permite que el dinero electrónico circule indefinidamente de mano en mano sin pasar por un depósito bancario. Alrededor de la cuarta parte de los habitantes de Swindon utilizan estas tarjetas en tiendas, restaurantes, lavanderías y quioscos de prensa. Este otoño empezará otro ensayo en Guelph, Ontario, donde incluso los parquímetros admitirán tarjetas.

coste de la transacción, pues está cargada con valor dinerario en lugar de actuar como mera indicatriz de una cuenta bancaria: transfiere el equivalente digital de las monedas o billetes a la "caja registradora" del comerciante, cuyo arqueo puede, más tarde, ingresarse en un banco. Los niños, los turistas y otras personas que no dispongan de cuenta bancaria en la localidad pueden servirse de estas tarjetas, cuya venta puede efectuarse incluso en máquinas expendedoras.

Las tarjetas de este tipo resultan particularmente atractivas para teléfonos públicos, pago de estacionamiento, fotocopiadoras y máquinas expendedoras, las cuales, eliminado el depósito para monedas, dejan de ser un objetivo tentador para ladrones y gamberros. Aunque sus "monederos digitales" todavía han de ser protegidos contra exacciones no autorizadas y contra el dinero electrónico falsificado, estos problemas parecen más sencillos de resolver que sus equivalentes con elementos materiales.

La eliminación del dinero tangible, sea en billetes o en moneda pico, podría evitar gastos nada despreciables. Los economistas estiman que el recuento, traslado, almacenaje y protección del dinero en efectivo supone alrededor del 4 por ciento del valor de todas las transacciones. También han de considerarse los intereses que se pierden al guardar el dinero en efectivo en lugar de ingresarlo en un banco. El Royal Bank de Canadá, que participa en ensayos con dinero digital en Ontario, mantiene en todo instante alrededor de mil millones de dólares al alcance de la mano.

En las tarjetas cargadas con efectivo, los costos por transacción tienden a ser inferiores a los de las tarjetas de crédito o del dinero ordinario, pero exigen una inversión inicial más elevada. Las tarjetas propiamente dichas son más caras y los primeros en propugnar su empleo tendrán que afrontar el costo de instalación de una infraestructura de equipos lectores. Además, será preciso modificar los programas informáticos diseñados para procesar transacciones con tarjetas de crédito o débito, capacitándolos para operar con las nuevas, más parecidos a una versión digital de los cheques de viaje. Un lector de tarjetas versátiles típico podría costar lo que valen los lectores de tarjetas magnéticas capaces de llamar a una compañía de tarjetas de crédito para la comprobación de transacciones.

Los precios de los lectores de tarjetas versátiles bajarán al aumentar el volumen de producción. Sin embargo, el coste de los equipos que es preciso instalar es importante. El número de tarjetas para pagos al contado está creciendo sin cesar; existen ya grandes programas en marcha o en proyecto en Estados Unidos, Australia, Canadá, Colombia, Chile, Dinamarca, España, Italia, Portugal, Reino Unido, Taiwan y otros países. El nivel de aceptación entre los consumidores no es el mismo en todos ellos. Las tarjetas ofrecen claras economías a bancos y a comerciantes, pero la traducción de tales ventajas en incentivos a los consumidores puede resultar difícil. Y los bancos nacionales de cada país se muestran comprensiblemente precavidos ante lo que de hecho supone un nuevo método de imprimir dinero, método sin reglas fijas que determinen qué autoridad garantiza su valor.

La mayoría de las tarjetas depositarias de efectivo que están en servicio son tarjetas desechables. Los dispositivos recargables funcionarían de igual manera a la hora de hacer las compras, pero habrían de contener programación adicional para permitir que el usuario transfiriera fondos a la tarjeta agotada. (La encriptación y otras técnicas de seguridad contribuirían a garantizar que las tarjetas fueran recargadas tan sólo mediante transacciones legítimas.) Citibank, Chase Manhattan, Visa y MasterCard están poniendo a punto un programa experimental para tarjetas de efectivo en la ciudad de Nueva York. Estas compañías van a proporcionar tarjetas versátiles recargables a unos 50.000 clientes; las tarjetas dispondrán también de bandas magnéticas ordinarias para las transacciones habituales. Alrededor de 500 tiendas, restaurantes y comercios de diverso tipo recibirán lectores capaces de aceptar transacciones con dinero electrónico. Para los recientes Juegos Olímpicos de Atlanta se emitió más de un millón de tarjetas versátiles, utilizables en los recintos olímpicos y en tiendas de las cercanías.

Cierto número de grupos están respaldando sistemas rivales para depositar valor dinerario en tarje-

Algunas aplicaciones de las tarjetas versátiles

APLICACION Y LUGAR	NUMERO DE TARJETAS	ESTADO
MasterCard Cash. Tarjeta de efectivo, Canberra	Emitidas 10.000	Comenzada en marzo de 1996. Las tarjetas se admiten en 250 tiendas
VisaCash. Tarjeta de efectivo. Atlanta	Más de 1 millón	Utilizables en recintos olímpicos, en transportes públicos y en tiendas
Proton. Tarjeta de efectivo. Bélgica, Holanda, Brasil, Australia	Emitidas 90.000	En proceso de introducción a plena escala
Tarjeta de identidad de la Seguridad Social. España	Ya emitidas 500.000. Previstas 7 millones en 1997, 40 millones en el año 2001	En proceso de introducción a plena escala. La tarjeta facilita el acceso al Seguro de Enfermedad. Comprobación por huella dactilar almacenada
Documento de identidad. Corea del Sur	Ya emitidas 1500	Proyecto experimental. La tarjeta contiene la identificación personal, permiso de conducción, servicios médicos y de jubilación
Tarjeta del Seguro de Enfermedad. Alemania	Emitidas 80 millones	Programa iniciado en 1994. Sólo para identificación del beneficiario
Tarjeta de información sanitaria. Unión Europea	Serán emitidas 200.000. Inicio en 1996	Proyectos experimentales de tarjetas que sólo contengan datos esenciales para tratamientos médicos
Tarjeta de transporte, sin contactos. Hong Kong	Ya emitidas 20.000; 3 millones en 1997	Iniciado con carácter experimental en noviembre de 1995. En proceso de introducción
Tarjeta de valor depositado y de identidad. Universidad Washington en San Luis	Emitidas 12.500	Sistema en servicio. Las tarjetas operan en máquinas expendedoras, lavanderías y otros servicios de pequeño importe. También sirven de documento de identidad para el acceso a las instalaciones de la universidad

FUENTE: CardTech/SecurTech '96 Conference Proceedings, Atlanta

tas versátiles. Todos usan prácticamente los mismos equipos, pero su programación no es la misma. Los fabricantes de lectores de tarjetas están, en consecuencia, poniendo a punto equipos capaces de manejar múltiples protocolos. Todavía no está claro qué sistema será el preferido por los clientes; cada uno presenta ventajas peculiares y puntos flacos. Los protocolos para depositar efectivo utilizados en los programas experimentales de Nueva York y Atlanta, sea por caso, son relativamente sencillos, pero limitados. Así, no está previsto que se pueda rescindir o reemplazar el valor de una tarjeta robada o perdida. El sistema DigiCash, basado en complejos protocolos criptográficos, es seguro y no deja rastro de sus operaciones, pero exige mayor capacidad de cómputo y, por ende, sus tarjetas son más caras. El sistema British Mondex, entretanto, aspira a ser un sistema seguro y a gran escala para reemplazar monedas y billetes: el dinero electrónico puede circular indefinidamente de un usuario a otro sin pasar por un depósito bancario. Está en curso un ensayo en Swindon, en el sur de Inglaterra, y está dando comienzo otro en Guelph, en Ontario; con él se prevé que hasta los parquímetros aceptarán dinero digital.

Signo característico de la versatilidad de esta técnica, las tarjetas pueden portar información médica de importancia. La tarjeta puede almacenar datos sobre la cobertura del seguro. Puede facilitar también información clínica básica, como listas de sensibilidades a medicamentos, el nombre y el teléfono del médico del titular u otras informaciones esenciales en caso de urgencia. Una tarjeta versátil que contuviera la información de mayor relevancia sobre el tratamiento que está siguiendo el paciente puede facilitar mucho la atención médica, sin revelar detalles delicados de carácter reservado o de titularidad, suponiendo que las autoridades sanitarias tratasen de ubicar el historial médico completo del paciente en un microcircuito para facilitar su portabilidad.

De hecho, bastaría automatizar el proceso de inscripción del nombre del paciente y de los datos de su seguro o de su cuenta en los formularios médicos para hacer mucho más eficiente el procesamiento de su seguro. En Alemania han empezado a proveer a todos los ciudadanos de una tarjeta electrónica que contendrá la información básica relativa a su seguro de enfermedad; en Francia se está investigando un programa similar.

En Francia y en Japón, los enfermos renales pueden disponer de una tarjeta versátil donde se recoge su historial de dialización y los tratamientos prescritos. Estos enfermos suelen necesitar dos o tres sesiones semanales de diálisis; además de la máquina, en cada sesión se requieren un determinado conjunto de parámetros y una combinación específica de fármacos. Antes de la introducción de las tarjetas versátiles, los enfermos estaban obligados a acudir al centro de diálisis donde se guardaba y actualizaba su historial, pero ahora pueden gozar de libertad de desplazamiento. Los controles de seguridad incorporados en la tarjeta contribuyen a garantizar que nadie, excepto los médicos y otras personas autorizadas, pueda leer o actualizar la información relativa al tratamiento.

A causa de los costos de telecomunicación que entraña la verificación de las transacciones mediante tarjeta de crédito, tal vez resulte apropiado que una de las aplicaciones más innovadoras del dispositivo se encuentre en el corazón de una nueva generación de comunicaciones móviles. El sistema global de comunicación móvil (GSM) establece una normativa técnica para los teléfonos celulares digitales; alrededor de 10 millones de personas disponen de teléfonos GSM, siendo más de 85 los países donde ya está disponible el servicio o donde se está instalando. Cada teléfono GSM está diseñado para aceptar una tarjeta versátil que contiene información relativa al número de teléfono del titular de la tarjeta y del conjunto de servicios a los que puede acceder. A una ejecutiva que viaje a Bélgica le basta extraer en su casa la tarjeta versátil de su unidad GSM e insertarla en otra prestada o alquilada en el lugar de destino. Cuando alguien marca su número, el sistema de seguimiento localizará automáticamente el aparato que esté provisto de su tarjeta versátil, se encuentre donde se encuentre, y le pasará la llamada. La tarjeta versátil puede, además, encriptar la transmisión, impidiendo las escuchas accidentales posibles con teléfonos celulares de otros tipos.

Al igual que con otras aplicaciones de las tarjetas versátiles, los Estados Unidos van rezagados en servicios GSM con respecto a muchos países. Existen ya unos cuantos programas experimentales, pero no se espera un despliegue generalizado hasta 1997. Los sistemas GSM que están siendo construidos allí operan a la frecuencia de 1,9 gigahertz, en lugar de los 1,8 habituales en otros países; utilizan además dos técnicas rivales e incompatibles. En consecuencia, los aparatos pueden resultar inservibles fuera de su ámbito. Las tarjetas versátiles que los animan tendrían, empero, que funcionar en todo el mundo.



5. LOS TELEFONOS CELULARES basados en la norma GSM carecen de vida faltos de una tarjeta versátil que se la infunda. La tarjeta contiene el número del abonado e información contable. Puede realizar también un procesamiento digital de la señal para codificar la conversación, frustrando así las escuchas que martirizan a los usuarios de teléfonos celulares analógicos.

Si las tarjetas versátiles pueden dotar de identidad a un dispositivo electrónico, ¿podrán servir también de credenciales infalsificables para las personas? Las tarjetas versátiles pueden portar muchísima más información que los rectángulos de cartulina o de plástico utilizados en documentos de identidad, permisos de conducción, tarjetas de seguros y otras. Y es probable que puedan portarla de modo mucho más seguro.

Las tarjetas de identidad suelen llevar una fotografía y una firma, para que las autoridades puedan comprobar que el portador y el titular son una misma persona. Las tarjetas versátiles pueden, para mejorar la seguridad, contener un número de identificación personal, pero también añadir un catálogo de identificadores biométricos de otros tipos: espectros de voz, huellas dactilares, barridos de la retina o del iris, pautas dinámicas de la

firma. Al serle presentada una tarjeta provista de un patrón de referencia, un ordenador puede determinar en qué medida concuerda su portador con ese patrón. En Holanda, las autoridades aduaneras han ensayado ya un sistema para acelerar en los aeropuertos las comprobaciones de identidad de los viajeros habituales. La persona apoya un dedo sobre una lámina de cristal y una cámara de vídeo capta su huella dactilar. Después, un ordenador coteja la imagen de vídeo con una huella de referencia almacenada en la tarjeta versátil. Estando la referencia en una tarjeta versátil, no es necesario conectar con una base de datos centralizada para la confirmación de identidad.

Estas técnicas de cotejo son imperfectas todavía. Las tarjetas versátiles funcionan bien, pero los algoritmos de extracción y comparación de patrones biométricos todavía son deficientes. Hay que decidir, además, si importa más rechazar a los impostores que garantizar que siempre sean aceptados los legítimos titulares: es improbable que una tarjeta que una vez al año someta a su portador a la embarazosa experiencia de un error de identificación consiga una aceptación generalizada.

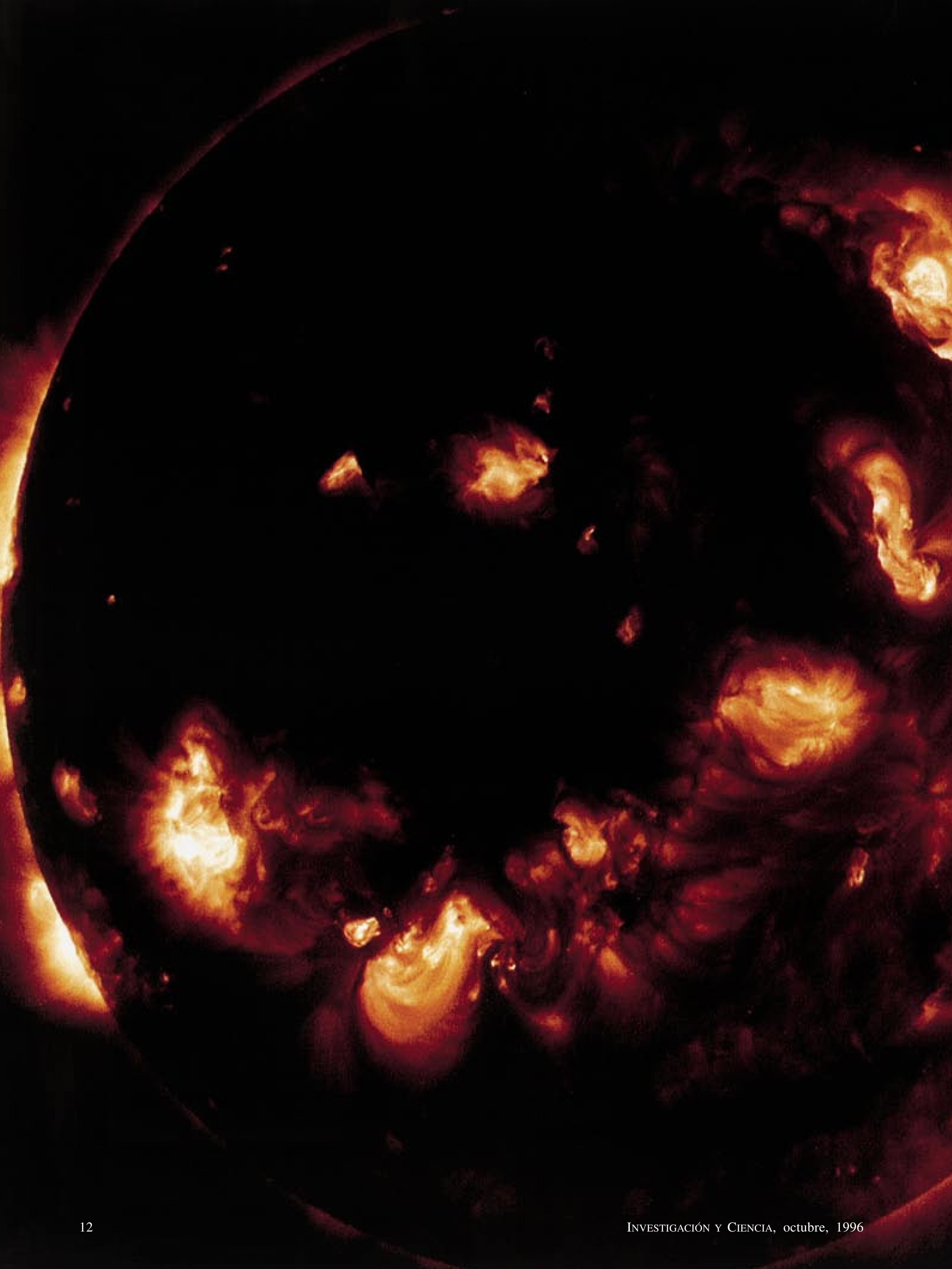
Esta y otras consideraciones hacen pensar que las tarjetas versátiles han alcanzado un primer estadio de madurez técnica: el factor limitante en los sistemas que las utilizan no es ya su capacidad. Su futuro depende, en cambio, del diseño de su programación informática, de aspectos económicos, de problemas de responsabilidad legal y de respeto a la intimidad, de la aceptación de los consumidores y de una multitud de otros problemas de índole política o personal.

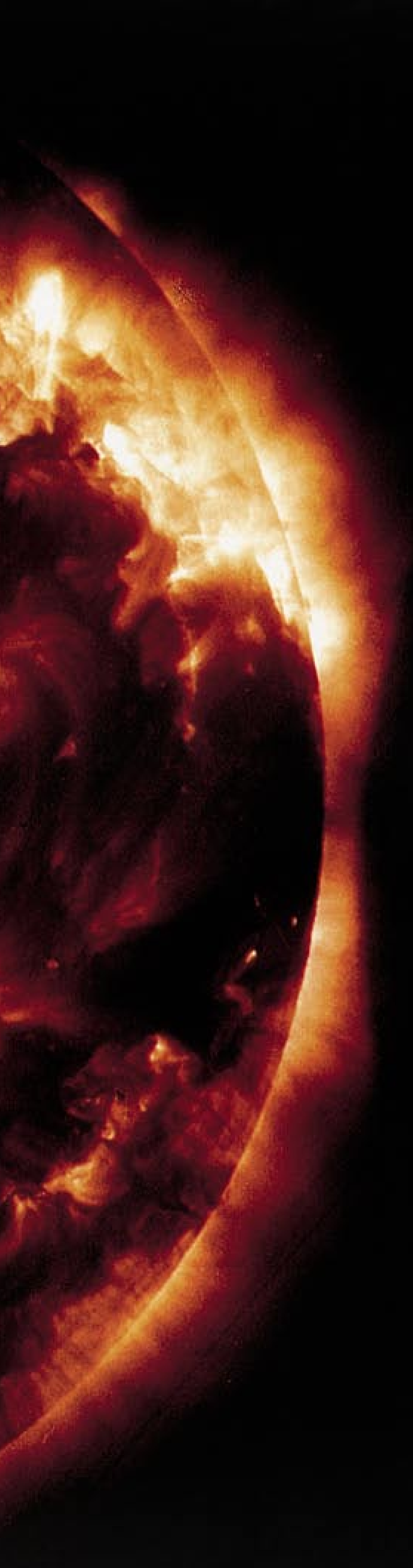
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A CHIP OFF THE OLD SECURITY BLOCK. Andrea McKenna Findlay en *Card Technology* (Faulkner & Gray), volumen 1, n.º 2, páginas 52-60; mayo-junio de 1996.

CRYPTOGRAPHIC SMART CARDS. David Naccache y David M'Raihi, en *IEEE Micro*, vol. 16, n.º 3, páginas 14-24; junio de 1996.

PUBLIC-KEY SECURITY SYSTEMS. Mahdi Abdelguerfi, Burton S. Kaliski, Jr., y Wayne Patterson, en *IEEE Micro*, vol. 16, n.º 3, páginas 10-13; junio de 1996.





La dinamo estelar

Los ciclos de manchas que se observan en las estrellas, similares a los del Sol, ayudan a entender las variaciones que éste sufre y sus efectos sobre la Tierra

Elizabeth Nesme-Ribes, Sallie L. Baliunas y Dmitry Sokoloff

Reflexionando sobre los caprichos del clima inglés, el astrónomo William Herschel observó en 1801 que había una correlación entre el precio del trigo y la desaparición de las manchas solares. Pero ese vínculo pronto se esfumó y pasó a ser parte de lo que para casi todos los científicos no era sino un mito: que los sucesos terrenales y los solares estuviesen ligados. Que el brillo del Sol variase y ello afectara al clima seguía siendo sólo una conjetura.

Cuando, a mediados de los años ochenta, tres satélites solares —*Misión del máximo solar*, *Nimbo 7* y *Cuantía de radiación terrestre*— detectaron que la luminosidad del astro disminuía, se supuso que los tres fallaban. Pero sus lecturas se avivaron luego al unísono, lo que no podía atribuirse a mera coincidencia. El Sol se enfriaba y recalentaba; la variación estaba, además, relacionada con el número de manchas en la superficie.

En los últimos años, uno de nosotros (Baliunas) ha venido observando que otras estrellas también experimentan cambios rítmicos muy parecidos a los del Sol. Así vamos conociendo mejor la "dinamo" que impulsa al Sol y a otras estrellas. Hemos descubierto, asimismo, que hay un fuerte vínculo entre las "manchas estelares" y la luminosidad, que confirma las pautas vistas en el Sol. Pero los astrofísicos —nosotros entre ellos— siguen debatiendo el significado de los ciclos solares y la medida en que influyen en el clima terrestre.

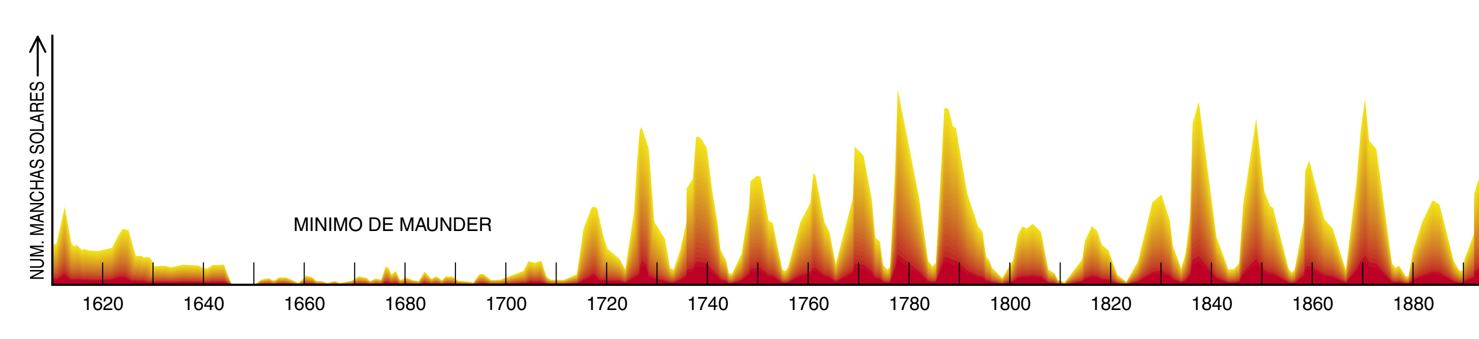
Manchas solares

Los primeros testimonios de la observación a simple vista de las manchas solares figuran en documentos chinos de hace 2000 años. Johannes Fabricius, Thomas Harriot, Christoph Scheiner y Galileo Galilei y algunos más abordaron, entre 1609 y 1611, el estudio de las manchas con telescopios. Se percibía con claridad una periodicidad de unos diez años en el número de manchas solares, como indicaría el astrónomo alemán Samuel Heinrich Schwabe en 1843. Ya en el siglo XX, George Ellery Hale, del Observatorio californiano del monte Wilson, descubrió que esas oscuras irregularidades superficiales albergaban potentes campos magnéticos, con intensidades de varios miles de gauss. (El campo magnético de la Tierra es de medio gauss en promedio.)

Las manchas solares parecen oscuras porque son 2000 grados más frías que la superficie circundante; si las viésemos con el cielo nocturno de fondo se nos aparecerían con una incandescencia anaranjadorrojiza. Se forman cuando los fuertes campos magnéticos suprimen el flujo de los gases circundantes y evitan que transporten el calor desde el interior hasta la superficie. Cerca de las manchas solares se ven a menudo unas zonas brillantes, las fáculas. Las líneas del campo magnético tienden a salir de la

1. LOS CAMPOS MAGNETICOS del Sol se manifiestan en esta fotografía de rayos X mediante los contornos curvos de las fulguraciones solares. Las líneas de los campos magnéticos emergen de la superficie y calientan los gases de la corona circundante hasta alcanzar temperaturas de 25 millones de grados Celsius, lo que produce su incandescencia. Las fulguraciones son más frecuentes durante los máximos de las manchas.

2. LAS MANCHAS SOLARES son regiones, frías en comparación con sus alrededores, que se forman donde emergen del Sol los campos magnéticos y queda así suprimido el ascenso de los gases calientes que proceden del interior. En otros puntos de la superficie aparecen, en forma de gránulos, células de gases que fluyen ciclónicamente, de espiral muy cerrada. Cerca de una mancha solar los campos magnéticos organizan el flujo gaseoso en líneas parecidas a las limaduras de hierro cerca de un barra imantada. El magnetograma (*recuadro interior*) muestra cómo las líneas de campo emergen de una mancha solar (*amarillo*) y vuelven a entrar por otra (*azul*); estas parejas de manchas son habituales.



3. LOS CICLOS DE ONCE AÑOS de actividad de las manchas solares se interrumpieron entre 1645 y 1715 por un período de calma, el mínimo de Maunder, que coincidió con unas temperaturas inesperadamente frías en el norte de Europa; las fluctuaciones solares, pues, ejercen una influencia sobre el clima terrestre. Desde el Observatorio de París se ha observado el actual pulso regular de la actividad solar (*derecha*) durante un ciclo entero. Estas fotografías se tomaron en la luz violeta emitida por calcio ionizado.







superficie por una mancha y entrar de nuevo en el Sol por otra; se forman así pares de manchas que recuerdan a los dos polos de una barra imantada y orientada, aproximadamente, en dirección este-oeste.

Al comienzo de cada ciclo de once años, las manchas solares hacen su primera aparición a unos 40 grados de latitud en ambos hemisferios; conforme avanza el ciclo se van formando más cerca del ecuador. En el mínimo de las manchas solares se observan junto al ecuador las regiones activas, zonas de magnetismo muy intenso. Además de las manchas solares, se ha visto que los polos geográficos del Sol presentan campos magnéticos globales débiles, de unos cuantos gauss. Este campo a gran escala presenta una configuración "dipolar", parecida al campo de una barra imantada. La mancha anterior del par —la que primero entra en el campo de visión a medida que el Sol gira de oeste a este— tiene la misma polaridad que el polo de su hemisferio; la mancha solar que la sigue (la posterior), la polaridad opuesta. Como descubrieron en 1925 Hale y Seth B. Nicholson, los patrones de polaridad se invierten cada once años; el ciclo magnético tarda, pues, 22 años en completarse.

Pero el comportamiento del Sol no siempre ha sido tan regular. En 1667, año en que se fundó el Observatorio de París, sus astrónomos comenzaron a observar de forma sistemática el Sol. Durante los 70 años siguientes anotaron más de 8000 jornadas de observación. Estos registros muestran una escasa actividad de las manchas solares, lo que no despertó gran interés hasta que se descubrió el ciclo que éstas seguían. Entonces Rudolf Wolf, del Observatorio de Zurich, examinó los archivos detenidamente.

ELIZABETH NESME-RIBES, SALLIE L. BALIUNAS y DMITRY SOKOLOFF investigan la vinculación del clima terrestre con las variaciones solares. Nesme-Ribes, astrónoma del Observatorio de París, ha dirigido un estudio exhaustivo de los archivos de manchas solares guardados en su instituto y que datan del siglo XVII. Baliunas, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, se dedica a seguir las variaciones de las estrellas de tipo solar en el Observatorio de monte Wilson, del que es directora suplente. Sokoloff enseña matemática en el departamento de física de la Universidad de Moscú.

Redescubrió el intervalo de calma de las manchas solares, pero se criticaron sus resultados; se le reprochaba que no hubiera utilizado toda la información disponible.

A finales del decenio de 1880 Gustav F. W. Spörer y a continuación E. Walter Maunder publicaron que la anomalía solar registrada en el siglo XVII había coincidido con un período frío en Europa. Esta asombrosa observación pasó inadvertida durante casi un siglo; muchos astrónomos daban por sentado que sus predecesores no habían sido lo bastante competentes contando manchas. Sólo en 1976 John A. Eddy, de la Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica en Boulder, reabrió el debate, y diez años más tarde E. Nesme-Ribes y sus colaboradores estudiaron los archivos de París y establecieron la validez de lo que ha venido a llamarse "el mínimo de Maunder".

Eddy también se percató de que la cantidad de carbono 14 presente en los anillos de los troncos de los árboles aumentaba durante la ausencia de manchas. Este elemento radiactivo se genera cuando los rayos cósmicos galácticos transforman en la alta atmósfera el nitrógeno 14 en carbono 14. Los hallazgos de Eddy sugerían que los campos magnéticos del viento solar —la ráfaga de partículas y energía que fluye desde el Sol—, cuando son fuertes, protegen a la Tierra de los rayos cósmicos y se forma una cantidad menor de carbono 14; la presencia de un exceso de carbono 14 indicaba un nivel bajo de actividad magnética en el Sol durante la fase de Maunder. De este modo Eddy reforzó el vínculo existente entre la escasez de manchas solares y el período de calma de la actividad solar.

Además de la poca abundancia de manchas durante el mínimo de Maunder, los archivos de París sacaron a la luz otra peculiaridad: entre 1661 y 1705 las pocas manchas detectadas por los astrónomos se encontraban sobre todo en el hemisferio sur. Se movían por la superficie solar, además, mucho más despacio que las que se detectan ahora. Hasta principios del siglo XVIII no adoptó el Sol su aspecto actual, con gran abundancia de manchas solares distribuidas de forma regular entre los dos hemisferios.

La dinamo solar

Se cree que la actividad magnética del Sol reside en su zona convectiva, los 200.000 kilómetros exteriores donde el transporte de la energía desde el interior solar hasta la superficie corre a cargo de gases agitados y calientes. El fluido forma violentos remolinos de tamaños muy dispares: el que mejor se conoce consiste en un conjunto de células convectivas o gránulos, cada uno con una envergadura, en la superficie, de 1000 kilómetros, pero que duran sólo algunos minutos. También existen "supergránulos", que miden de 30.000 a 50.000 kilómetros y cuyos flujos son aún mayores. La rotación origina fuerzas de Coriolis, y éstas hacen que los remolinos del hemisferio norte fluyan en sentido contrario a las agujas del reloj (mirando la superficie desde arriba) y al revés en el hemisferio sur; estas direcciones se denominan ciclónicas.

Se desconoce si hay ciclones similares bajo la superficie. Con la profundidad, la zona convectiva da paso a la radiativa, donde la radiación transporta ahora la energía. El núcleo del Sol, donde el hidrógeno se convierte en helio y alimenta toda la actividad solar, parece rotar de forma rígida y lenta en comparación con la superficie.

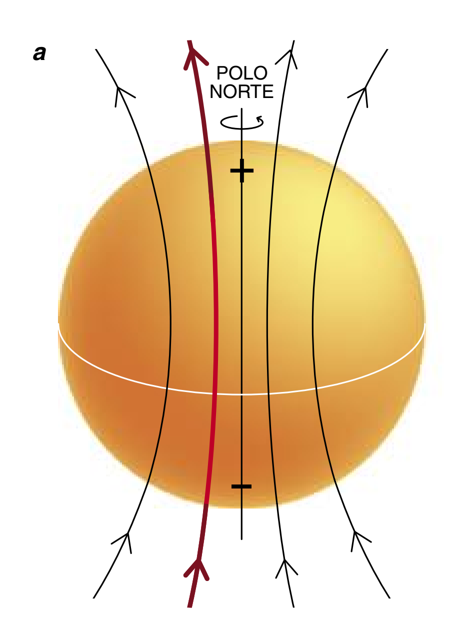
La primera descripción sobre la peculiar odenación de los gases solares para crear campo magnético fue propuesta en 1955 por Eugene N. Parker, de la Universidad de Chicago. La elevada temperatura provoca que los átomos de hidrógeno y helio pierdan sus electrones; se engendra así una sustancia dotada de carga eléctrica, o plasma. En su movimiento, las partículas cargadas generan campos magnéticos. Recuérdese que las líneas que representan los campos magnéticos forman bucles continuos, sin

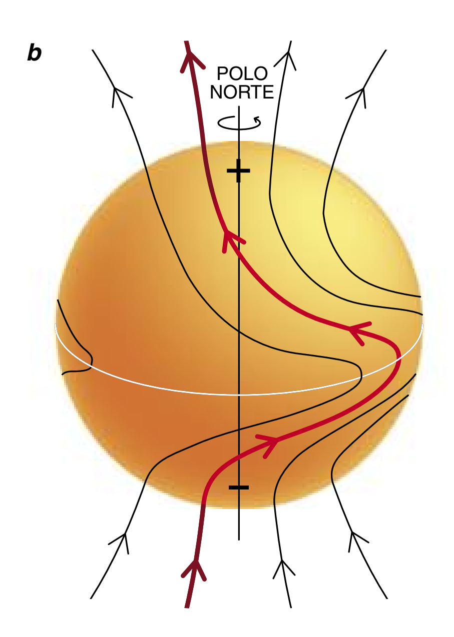
NUM. MANCHAS SOLARES
1900 1920 1940 1960 1980 2000

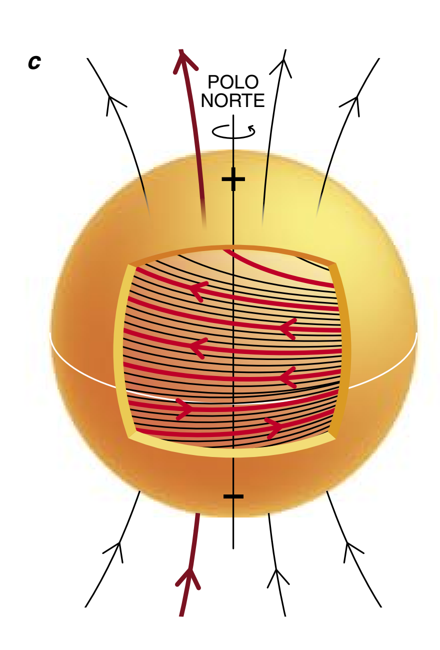


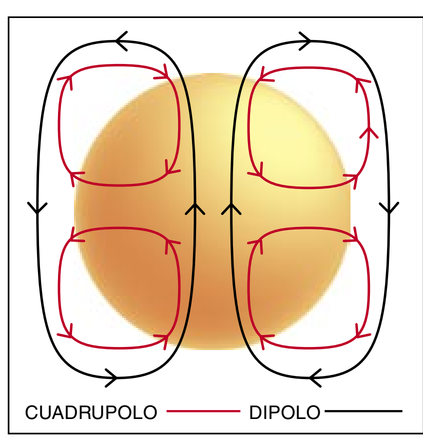
MAXIMO











4. LA DINAMO SOLAR genera el campo magnético del Sol y hace que se invierta su orientación cada once años. Supongamos que el campo magnético inicial (*a*) se asemeja al de una barra imantada cuyo polo norte (+) esté cerca del polo norte geográfico del Sol. Los gases cargados eléctricamente arrastran consigo las líneas de campo magnético. El flujo más veloz que se registra en el ecuador distorsiona, por consiguiente, las líneas de campo (*b*) hasta que ciñen apretadamente el Sol (*c*). Ahora bien, las líneas de campo oponen resistencia

principio ni fin, y que su densidad (la medida en que las líneas están cerca unas de otras) y su orientación indican la intensidad y la dirección del campo magnético. Por ser un eficaz conductor de electricidad, el plasma tiende a atrapar las líneas del campo: si se movieran a través del plasma, generarían una corriente eléctrica enorme, muy costosa desde el punto de vista energético.

Por tanto, el plasma arrastra consigo los campos magnéticos, que terminan por enhebrarse. Las hebras entrelazadas envuelven campos de polaridad opuesta que tienden a anularse mutuamente. Pero la rotación del Sol genera fuerzas organizativas que periódicamente desenredan los lazos y crean un campo magnético global. Este motor automático, que genera magnetismo a partir del flujo de electricidad, es la dinamo solar.

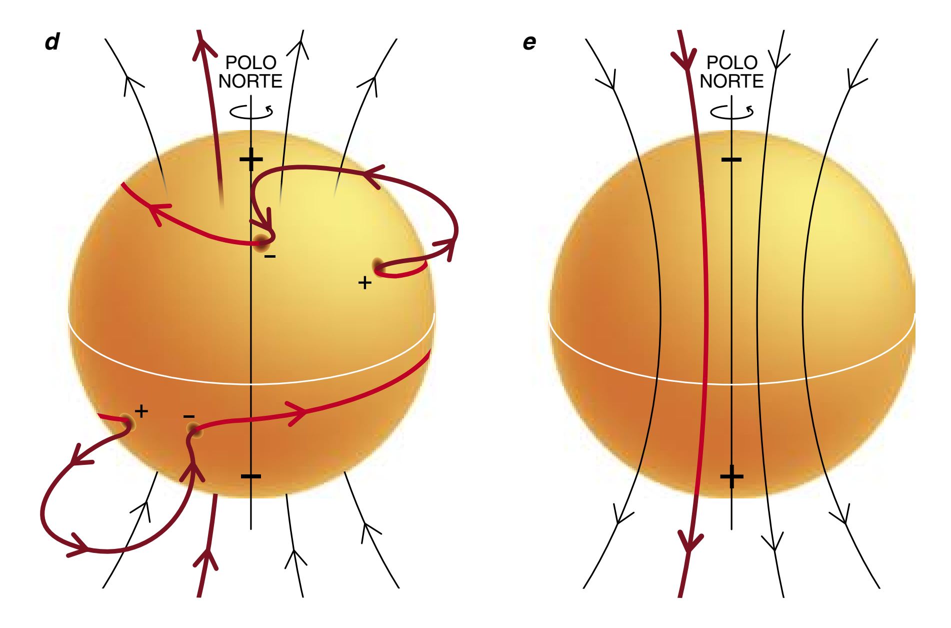
La dinamo consta de dos componentes esenciales: los ciclones convectivos y la rotación desigual (no uniforme) del Sol. A mediados del siglo pasado Richard C. Carrington, astrónomo aficionado británico, descubrió que las manchas solares situadas cerca del ecuador giran un dos por ciento más deprisa que las localizadas a latitudes intermedias. Como las manchas flotan con el plasma, el dato indica que la superficie del Sol gira a diferentes velocidades. El período de rotación es de unos 25 días en el ecuador, 28 a una latitud de 45 grados e incluso mayor a latitudes superiores. Esta rotación diferencial debería extenderse a lo largo de toda la zona convectiva.

Supongamos ahora que la morfología inicial del campo solar fuera la de un dipolo orientado más o menos en dirección norte-sur. En tal caso, la rotación más rápida tiraría en el ecuador de las líneas del campo y las deformaría en la dirección este-oeste, hasta que terminaran por situarse en dirección paralela al ecuador y flotaran hacia la superficie, donde emergerían en forma de pares de manchas solares.

Pero las fuerzas de Coriolis tienden a alinear los ciclones y, por ende, las manchas, que quedan obligadas a seguir los giros del plasma. Los ciclones disponen las manchas de modo que, por ejemplo, una mancha solar posterior en el hemisferio norte se sitúe en una latitud ligeramente superior que la mancha delantera. Se van estirando las líneas ecuatoriales de campo, hasta que acaban por desenrollarse y derivar afuera. La mancha solar posterior llega antes al polo solar, e invierte allí el campo magnético. (Recuérdese que la polaridad de la mancha posterior es la opuesta a la del polo más cercano durante el período que sigue al máximo de las manchas solares.) Aquellas líneas de campo que al principio se extendían mucho más allá del Sol se reconectan formando bucles y el viento solar las dispersa. De este modo el campo magnético global se invierte y el ciclo comienza de nuevo.

Pero hay que hacer una advertencia. Este sencillo cuadro parece estar reñido con ciertos hallazgos recientes de la heliosismología, la ciencia de los terremotos solares. El modelo exige que el Sol gire más rápidamente en el interior; por contra, los resultados del GONG (*Global Oscillation Network Group*), un programa de colaboración internacional que reúne a varios observatorios, muestran que la velocidad de rotación cerca del ecuador disminuye hacia el interior. Este tipo de experimentos está proporcionando información precisa sobre los movimientos internos del Sol, y así contribuyen a depurar la teoría de la dinamo.

Pero, ¿qué sucedió durante el mínimo de Maunder? Para explicar este período de calma, dos de nosotros (Nesme-Ribes y Sokoloff) apuntamos que el campo magnético había de tener también, aparte de la configura-



al estiramiento y se desenrollan, ascendiendo hacia la superficie, donde surgen convertidas en un par de manchas solares (*d*). Tales máculas solares se dirigen entonces hacia los polos; la primera en llegar es la mancha posterior, razón por la cual el campo total se invierte (*e*). Además del campo dipolar representado arriba, el Sol seguramente cuenta también con un campo "cuadrupolar" (*recuadro de la página anterior, en rojo*); su "latido" junto al del campo dipolar causó el mínimo de Maunder.

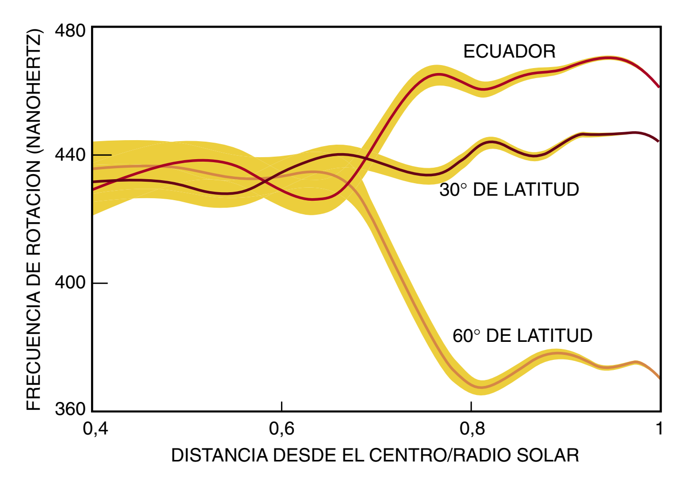
ción dipolar, una pequeña componente cuadrupolar, semejante al campo de dos barras imantadas situadas en paralelo. Si el cuadrupolo oscila a una velocidad un poco diferente de la del dipolo, las manchas solares de un hemisferio se originarán un poco antes que las del otro: eso es precisamente lo que observamos ahora. Además, a lo largo de los últimos cuatro siglos ciertos ciclos solares han mostrado un número desigual de manchas solares en uno y otro hemisferio. Este patrón parece repetirse cada siglo más o menos, exactamente lo que cabría esperar si el dipolo "latiese" con un cuadrupolo débil.

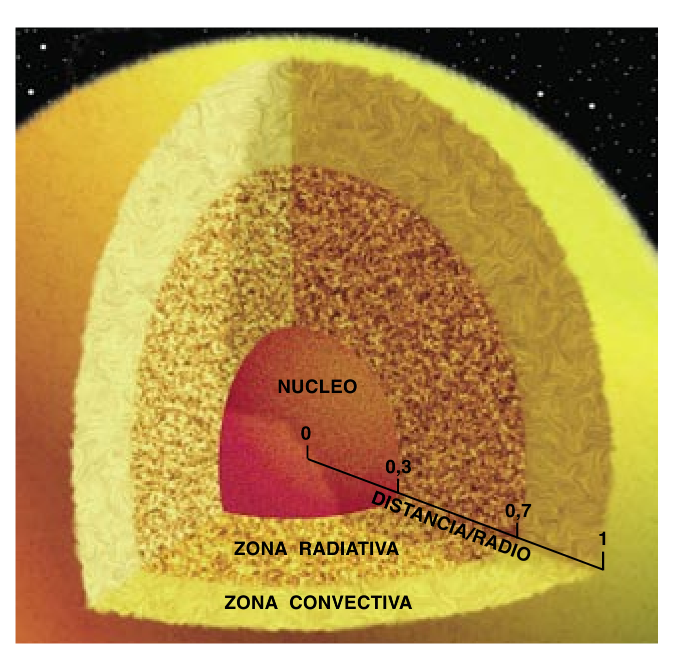
Pero supongamos que el campo del cuadrupolo es tan fuerte como el dipolo. Las líneas de campo ecuatoriales que nacen del estiramiento de esa combinación se anularán en uno de los hemisferios pero persistirán en el otro. Las pocas manchas que aparecerán lo harán sólo en un hemisferio, tal como los astrónomos del siglo XVII observaron durante el mínimo de Maunder.

Podemos encerrar la compleja relación entre los campos dipolar y cuadrupolar en un "número de dinamo" *D*. Este número es el producto de la helicidad, o el movimiento en espiral, del plasma y la velocidad local del cambio de la rotación. Cuando *D* es muy pequeño, el campo magnético tiende a desvanecerse; pero cuando aumenta, reaparece el campo del cuadrupolo, seguido del dipolo. Superado un valor crítico de *D*, los dos componentes del campo se mantienen estables. Conforme *D* aumenta aún más, la dinamo se torna periódica, creciendo y disminuyendo según ciclos regulares; éste es el régimen en que se encuentra el Sol actualmente. Un campo de cuadrupolo débil, que late en fase con el dipolo, da lugar a ciclos cortos e intensos; un campo de cuadrupolo más intenso, ligeramente desfasado con respecto al campo del dipolo, alarga y debilita el ciclo de las manchas solares. Superado el número de dinamo crítico, aparece el caos.

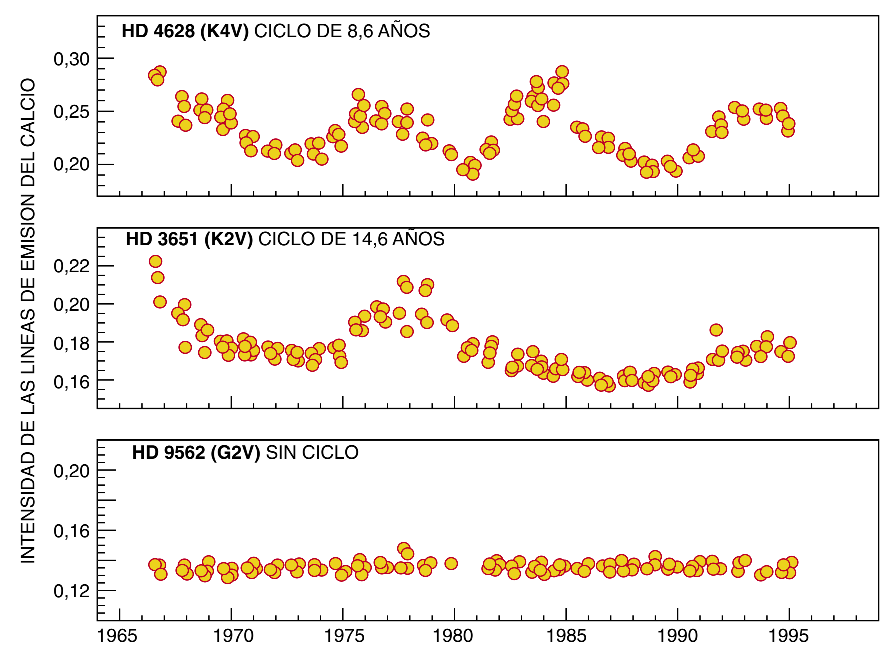
Estrellas dinámicas

Como ya sabemos, el brillo del Sol aumenta con la actividad magnética a lo largo del ciclo: las fáculas luminosas superan a las oscuras manchas solares. (Se supone que, a medida que aumenta y disminuye el brillo, la energía total del Sol se canaliza transitoriamente hacia diferentes "depósitos": cinético, magnético, térmico o potencial.) Durante los últimos dieciséis años de observaciones con





5. LA ROTACION de la superficie solar es más rápida en el ecuador y más lenta cerca de los polos. Esta rotación diferencial (medida por el GONG gracias a los seísmos solares) afecta a las capas exteriores. El núcleo del Sol, donde la fusión genera la energía que, en última instancia, impulsa la dinamo, seguramente gira a una velocidad angular constante, como un cuerpo rígido.



6. SE LLAMAN CICLOS ESTELARES los cambios operados en la actividad magnética de las estrellas cercanas. Dichos ciclos se detectan por medio de las líneas violeta de emisión de su calcio. Estas tres estrellas muestran un comportamiento magnético similar al del Sol: ciclos estables (*arriba*), ciclos que decrecen hasta alcanzar un mínimo similar al de Maunder (*centro*) y la calma absoluta, una fase de Maunder (*abajo*). El estudio de estas estrellas revela que el Sol puede exhibir variaciones mucho mayores que las que vemos actualmente.

satélites, la energía total emanada del Sol ha variado alrededor de un 0,1 por ciento entre una fase magnéticamente activa y más brillante y una fase de calma, más débil.

La brevedad de los registros tomados por los satélites impide que conozcamos la variabilidad del brillo solar a lo largo de varias décadas, dato vital para evaluar la influencia del Sol sobre la Tierra. Una forma de afrontar la cuestión es examinar los ciclos de las "manchas estelares" en otras estrellas.

No es fácil cartografiar los rasgos del relieve estelar. Pero a medida que los campos magnéticos calientan las capas externas de la atmósfera de una estrella, esas capas radian energía en ciertas líneas espectrales. Por ejemplo, en el Sol, la intensidad de las dos líneas de emisión de color violeta del calcio (con longitudes de onda de 396,7 y 393,4 nanómetros) se corresponde estrechamente con la intensidad y la extensión de los campos magnéticos. Las variaciones de estas líneas nos proporcionan, por tanto, una medida de los cambios que tienen lugar en el magnetismo superficial de una estrella.

En 1966, Olin C. Wilson emprendió en el Observatorio del monte Wilson un programa de medición de la actividad magnética de unas cien estrellas de la secuencia principal: las que, como el Sol, están quemando hidrógeno. (Cuando el hidrógeno se agota, la estrella se expande hasta convertirse en una gigante roja.) La mayoría de esas estrellas manifiestan una evidente actividad magnética mediante las alteraciones de las líneas de emisión de color violeta del calcio. Las fluctuaciones varían mucho en amplitud y duración, dependiendo principalmente de la edad y la masa de la estrella.

Todas estas estrellas poseen un número de dinamo que sobrepasa el valor crítico requerido para mantener los campos magnéticos. Para una estrella joven de 1000 o 2000 millones de años el período de rotación es rápido, de unos 10 a 15 días. El alto valor resultante de *D* significa que estas estrellas jóvenes presentan fluctuaciones erráticas en su actividad magnética a lo largo de intervalos de sólo dos años y carecen de ciclos bien definidos. Las fluctuaciones a veces se repiten, sin embargo, con períodos de entre dos y veinte años aproximadamente, que se alargan con la edad.

Ahora bien, conforme envejece, la estrella modera su velocidad de rotación —debido a que el viento magnético vence a su momento angular— y *D* disminuye. Entonces empieza un verdadero ciclo de dinamo, con un período de seis o siete años y a veces incluso con dos períodos independientes. Más tarde —cuando *D* es aún menor— un solo período domina, alargándose de ocho a catorce años con la edad. Además, hay ocasionalmente mínimos de Maunder. Si la rotación se hiciera aún más lenta, en las estrellas más viejas, se predeciría una estabilización del campo magnético. La muestra de Wilson contiene algunas estrellas muy viejas, pero todavía exhiben ciclos, lo que indica que en 10.000 millones de años —tras los cuales pronto se expandirán convirtiéndose en gigantes rojas— no se llega a la dinamo estable.

Para concentrarnos en la dinamo solar, Baulinas y su equipo redujeron la amplia muestra de Wilson a las estrellas que fueran similares al Sol en masa y edad. En la actualidad el grupo comprende las observaciones registradas a lo largo de treinta años de entre veinte y treinta estrellas, dependiendo de los criterios que definan la similitud con el Sol. La mayoría de tales estrellas muestra ciclos muy definidos, parecidos en amplitud y período a los del Sol. Alrededor de un cuarto de los registros muestran estrellas en calma absoluta, lo que sugiere una fase semejante al mínimo de Maunder del Sol. Esto quiere decir que la cuarta parte de la vida de las estrellas de tipo solar transcurre en un período de calma.

Acabamos de descubrir una estrella, HD 3651, en transición entre la fase cíclica y el mínimo de Maunder. Este objeto venía mostrando un comportamiento periódico durante unos doce años, hasta que dejó de fluctuar y su actividad superficial descendió a niveles muy bajos. Su entrada en el estado de mínimo de Maunder fue sorprendentemente veloz. Así es como las estrellas de tipo solar, observadas sólo durante unos decenios, nos proporcionan "instantáneas" de la variabilidad solar a lo largo de escalas temporales de siglos.

El brillo de estas estrellas de tipo solar también se puede comparar con su actividad magnética. En 1984 empezó en los observatorios Lowell y Sacramento Peak la observación fotométrica detallada y precisa de algunas estrellas de la muestra de Wilson. Quienes trabajamos en la Universidad estatal de Tennessee y el Observatorio Smithsoniano de Astrofísica hemos utilizado telescopios automatizados para observar algunas de ellas. Todas muestran un máximo de brillo cerca del pico del ciclo de actividad. Algunas varían tan poco como el Sol —sólo un 0,1

por ciento durante el último ciclo de once años—, pero otras han experimentado variaciones de hasta un 0,6 por ciento en un ciclo. Por tanto, el comportamiento actual del Sol podría ser un indicador poco fiable de la gama completa de fluctuaciones de la que es capaz.

A lo largo de los años se ha inferido la historia evolutiva de las estrellas de tipo solar a partir del conjunto de registros estelares existentes. Una estrella joven presenta un rápido período de rotación de varios días junto con elevados e irregulares niveles de magnetismo superficial. Las variaciones magnéticas van acompañadas por cambios del brillo, que aumenta incluso en algún tanto por ciento. Sin embargo, la estrella joven llega a su mayor oscuridad durante el pico de actividad magnética, seguramente porque las manchas oscuras son tan grandes que predominan sobre las fáculas. A medida que la estrella de tipo solar envejece, su rotación se hace más lenta y disminuye la actividad magnética. En estas estrellas "más viejas" aparecen mínimos de Maunder y los picos de la luminosidad coinciden con los máximos de las manchas solares, con fluctuaciones de un uno por ciento o menos en un mismo ciclo.

La influencia sobre la Tierra

Los resultados obtenidos a partir del estudio de las manchas estelares apuntan a un cambio del brillo de al menos un 0,4 por ciento entre la fase cíclica y la fase del mínimo de Maunder. Este valor se corresponde con un descenso en la energía neta emanada del Sol de un watt por metro cuadrado en la parte superior de la atmósfera terrestre. Las simulaciones llevadas a cabo en el Laboratorio de Meteorología Dinámica de París y en otros centros sugieren que tal reducción, a lo largo de varias décadas, sería capaz de enfriar la temperatura promedio de la Tierra en uno o dos grados centígrados, una cantidad suficiente para explicar el enfriamiento observado durante el mínimo de Maunder.

Pero puede que los gases generadores de efecto invernadero producidos por el hombre estén calentando la Tierra al atrapar el calor que, si no, saldría irradiado hacia el espacio. Este calentamiento equivale a que la Tierra reciba una radiación de dos watts por metro cuadrado en la superficie. El Sol parece haber depositado en la Tierra no más y no menos que de 0,5 a 1,0 watts por metro cuadrado durante los últimos siglos. Por tanto, si el calentamiento directo fuese el único modo en que el Sol afecta al clima de la Tierra, a estas alturas los gases de invernadero estarían ya dominando el clima, y cualquier correlación con la actividad solar quedaría destruida.

Sin embargo, el vínculo entre clima y manchas solares parece bastante persistente. La duración, por ejemplo, del ciclo de las manchas solares guarda una estrecha correlación con las temperaturas globales registradas durante los últimos cien años. De siete mínimos en el magnetismo solar durante los últimos 5000 a 6000 años —según se desprende del radiocarbono detectado en los anillos de los troncos de los árboles—, seis coinciden con intervalos de clima más fresco. Además, por razones que aún se desconocen, el ciclo de las manchas solares guarda correlación con los patrones del viento estratosférico. Todas estas pruebas inducen a algunos científicos, entre los que nos incluimos, a sostener que el Sol deja también sentir su influjo sobre la Tierra por vías, aunque indirectas, poderosas.

Las variaciones en la radiación ultravioleta del Sol, por ejemplo, podrían modificar el contenido de ozono y la dinámica de nuestra alta atmósfera. Simulaciones recientes indican también que los vientos de la baja estratosfera pueden transportar las variaciones de la irradiancia solar hasta la troposfera, donde interaccionan más directamente con el sistema climático. Estas cuestiones se han convertido en motivo de acalorados debates. Si se consigue desentrañar de qué forma el Sol calienta la Tierra, obtendremos una información vital acerca del papel que la humanidad, y el Sol, desempeñan en el proceso de cambio climático.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOL CAMBIANTE. Peter V. Foukal en *Investigación y Ciencia*, n.º 163, abril de 1990.

GUIDE TO THE SUN. Kenneth J. H. Phillips. Cambrige University Press, 1992.

EXPLORER OF THE UNIVERSE: A BIOGRAPHY OF GEORGE ELLERY HALE. Helen Wright. American Institute of Physics Press, 1994.

SUN, EARTH AND SKY. Kenneth R. Lang. Springer Verlag, 1995.

Gradientes organizadores del desarrollo del embrión

Unas cuantas señales moleculares cruciales originan gradientes químicos que organizan el desarrollo del embrión

Christiane Nüsslein-Volhard

Los osos se aparean en invierno. La hembra se retira luego a una cueva para parir, pasados varios meses, tres o cuatro oseznos. Estos, al nacer, son como bolas de carne informes; sólo las garras están desarrolladas. La madre los lame dándoles así su forma.

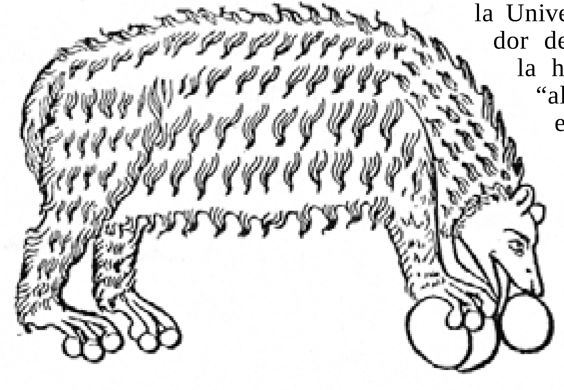
Esta antigua conseja, que recoge Plinio el Viejo, es una de las muchas y curiosas ideas propuestas años ha para explicar uno de los mayores misterios de la vida: el desarrollo de un oocito (célula huevo) casi uniforme hasta convertirse en un animal con docenas de clases de células, cada una localizada en su sitio preciso. La dificultad estriba en poder hallar una explicación para este sorprendente incremento de complejidad. Una teoría más seria, que gozó de aceptación en los siglos XVIII y XIX, mantenía que el huevo no carecía de estructura, como parece a primera vista, sino que contenía un mosaico invisible de "determinantes" que bastaba desplegar para dar lugar a un organismo maduro. Cuesta entender cómo semejante teoría resistió tanto tiempo. Si un huevo contuviera la estructura completa del animal adulto en una forma invisible, debería también contener las estructuras de todas las generaciones posteriores, puesto que las hembras adultas producirían a su debido tiempo sus propios huevos, y así sucesivamente, *ad infinitum*. El propio Goethe, naturalista sobresaliente, se inclinó por esta "hipótesis preformacionista" al no encontrar explicación mejor.

Hace unos cien años los embriólogos comenzaron a advertir, en sus trabajos experimentales, que los caminos del desarrollo no necesitaban estar completamente predeterminados en el momento en que se formaba el huevo. Descubrieron que ciertas manipulaciones experimentales producían cambios espectaculares en el desarrollo, inexplicables en el marco de la hipótesis del mosaico. Por ejemplo, si partían en dos un embrión de erizo de mar en el estadio de dos células, cada una de ellas formaba un animal entero, aun cuando las dos células juntas hubieran también formado un solo animal de no haberse separado. De modo parecido, cuando los embriones humanos se escinden accidentalmente, el resultado es la formación de gemelos idénticos.

Poco a poco fue emergiendo una idea importante: la hipótesis del gradiente. Entre quienes abogaron por la misma figura Theodor H. Boveri, de la Universidad de Würzburg, fundador de la teoría cromosómica de la herencia. Boveri sugirió que "algo aumentaba o disminuía en su concentración" de un extremo al otro del huevo. La hipótesis venía a decir, en síntesis, que las células de un campo de desarrollo respondían a una sustancia especial —un morfógeno— cuya concentración aumentaba gradualmente en cierta dirección, formando un gradiente. La hipótesis proponía, además, que las diferentes concentraciones del morfógeno causaban respuestas distintas en las células.

Si bien la existencia de gradientes de concentración de morfógenos podría explicar en principio cómo las células "conocen" su posición en el embrión, la idea tardó mucho tiempo en aceptarse por la mayoría. Una de las dificultades con las que tropezaba era la de explicar que un gradiente morfogenético pudiera establecerse y permanecer estable durante un período suficiente. En un tejido en desarrollo, compuesto por muchas células, las membranas celulares impedirían la difusión de las macromoléculas que constituirían el gradiente de concentración. Se objetaba, ahora desde el extremo opuesto, que en un único oocito grande la difusión igualaría en seguida los niveles del gradiente. Por no hablar de la naturaleza bioquímica y el mecanismo de acción de los morfógenos, todo un misterio.

Para la mayoría de los biólogos, los medios de formación de un gradiente permanecieron desconocidos hasta hace poco, cuando investigadores de varios laboratorios descubrieron gradientes que operaban en el embrión temprano de *Drosophila*, la mosca del vinagre. Para los ajenos a la profesión, resulta llamativo que muchos de los mecanismos del desarrollo se conozcan mejor en *Drosophila* que en animales más cercanos al hombre. Los ejemplos que describiré sacarán al lector profano de su perplejidad al mostrar el singular valor de



1. LO QUE PARECIA un milagro en el desarrollo animal confundió a los primeros estudiosos. Este dibujo del siglo XVI muestra a una osa dando forma mediante lametones a su descendencia, que se creía que nacía informe.

Drosophila como sujeto experimental: una coincidencia afortunada de ventajas la convierten en un animal óptimo para los estudios de genética, embriología y biología molecular.

A principios de siglo se escogió la mosca del vinagre para estudiar genética mendeliana por su fácil manejo, ciclo reproductor corto y numerosa descendencia, lo que permitía buscar mutantes mediante el análisis de miles de moscas. Los estudios de mutantes habían resuelto con éxito rutas metabólicas y procesos reguladores en virus, bacterias y levaduras, hasta que hace veinte años decidí, con Eric F. Wieschaus, hoy en la Universidad de Princeton, generalizar ese cuadro experimental en *Drosophila*; nos aprestamos a buscar genes que controlaran la forma segmentada de la larva. La larva, con su milímetro aproximado de longitud, resulta ser bastante grande y tiene segmentos repetidos y bien definidos que van emergiendo en el arco de las primeras 24 horas tras la oviposición. Estas características encierran una importancia decisiva a la hora de interpretar las anomalías inducidas experimentalmente que afectan al patrón de desarrollo.

CHRISTIANE NÜSSLEIN-VOLHARD comenzó investigando en las bacterias su bioquímica y transcripción génica. Hacia la mitad de los setenta se pasó al estudio de *Drosophila* en la Universidad de Basilea; allí inició el programa de investigación descrito en este artículo. En 1978, y en el Laboratorio de Biología Molecular Europeo de Heidelberg, Eric Wieschaus y ella abordaron los genes implicados en la formación del patrón embrionario. A lo largo de los últimos 10 años, Nüsslein-Volhard ha dirigido la división de genética del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo en Tübingen. El pasado año compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina con Wieschaus y Edward B. Lewis.

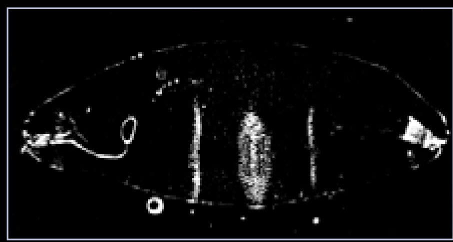
Drosophila ofrece otra ventaja clave en los estudios embriológicos: durante su desarrollo temprano el embrión no se divide en células separadas. En los embriones de la mayoría de los animales, cuando se divide el núcleo celular, con él se divide el resto de la célula. Las membranas celulares segregan entonces las mitades, formando dos células donde había una; y, por tanto, el embrión crece como un agregado de células. No ocurre así en *Drosophila*. El núcleo del huevo fecundado se divide repetidamente, pero las membranas no aíslan a los núcleos. Andando el tiempo, encontramos miles de núcleos alojados en la periferia de lo que es todavía, por así decirlo, una sola célula. Sólo cuando han transcurrido unas tres horas de divisiones, y se han formado unos 6000 núcleos, aparecen las membranas que los separan.

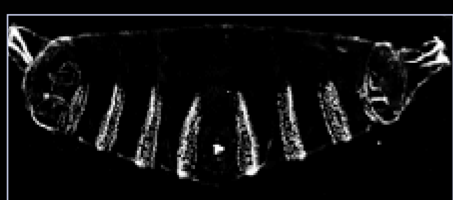
Esta peculiaridad permite a los productos difundirse libremente por el embrión temprano e influir en el destino de desarrollo de grandes zonas del mismo. Ello significa que, en el transcurso de nuestros experimentos, podemos trasplantar citoplasma (el fluido viscoso de las células) o inyectar biomoléculas en varias regiones del embrión de *Drosophila* y observar los resultados.

El poder de los gradientes

Por si fuera poco, *Drosophila* se presta a un estudio cómodo con las técnicas de biología molecular. El insecto posee sólo cuatro pares de cromosomas, que existen en una

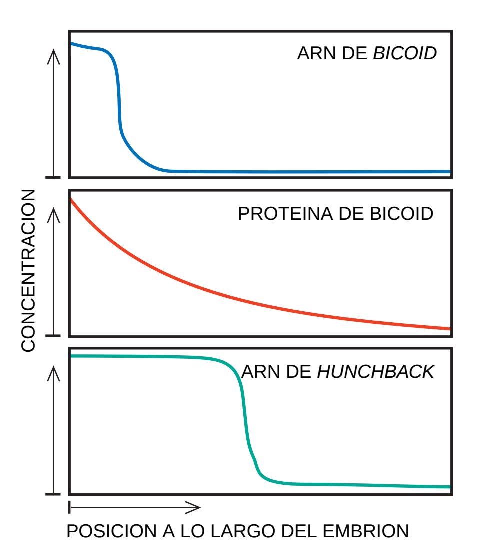






2. LA MANIPULACION de los gradientes de proteínas ha producido dos embriones anormales de la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster* (*a la izquierda*). Uno tiene dos cabezas en los extremos, en imagen especular (*arriba*); el otro tiene dos extremos abdominales (*abajo*). Los embriones, que no dan lugar a larvas viables, están teñidos para mostrar proteínas específicas.





3. EL HUEVO DE *DROSOPHILA* recién puesto tiene el ARN de *bicoid* localizado en el extremo anterior, o cabeza (*distinguible por la tinción en el extremo superior izquierda*). Dos horas más tarde, la proteína Bicoid se ha extendido, a partir de ahí, por todo el embrión (*paneles intermedios*). La concentración del gradiente de Bicoid supera un umbral y activa el gen *hunchback* sólo en la mitad anterior del embrión (*paneles inferiores*).

forma especial gigante. Los cromosomas gigantes suelen dejar ver al microscopio las alteraciones del material genético producidas por las mutaciones, lo que reviste particular interés en el curso de la investigación. Una última ventaja, también muy importante, reside en el partido que podemos sacar de la presencia de elementos genéticos móviles y en la adición, con notable rendimiento, de genes específicos al complemento genético de *Drosophila*.

A través del estudio de mutantes se han identificado una treintena de genes que son activos en las hembras y organizan el patrón del embrión. Sólo tres de ellos determinan (codifican) señales moleculares que especifican las estructuras del eje antero-posterior (cabeza-cola) de la larva. Cada señal se localiza en un sitio particular del embrión y promueve la formación de diferentes tipos de gradientes morfogenéticos. En cada caso, el morfógeno tiene su concentración máxima en el sitio de formación de la señal.

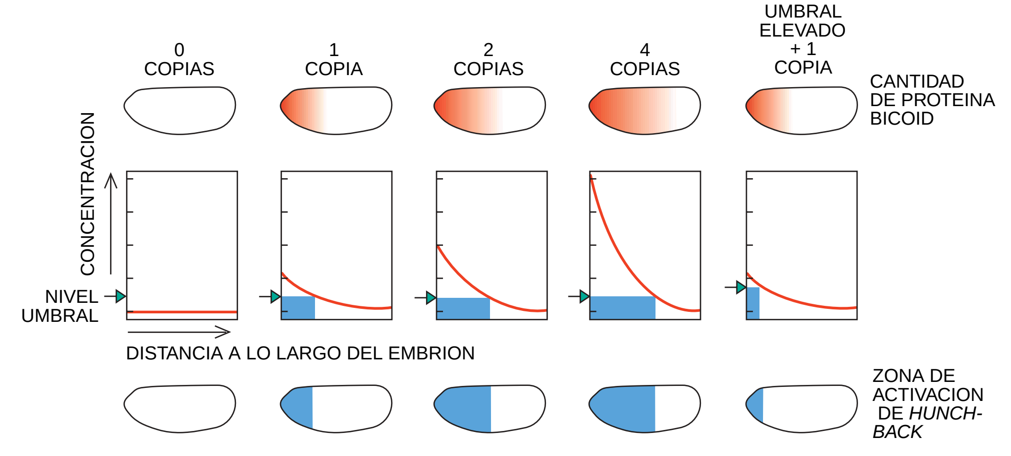
Una de estas señales controla el desarrollo de la mitad anterior del huevo, que da lugar a la cabeza y el tórax de la larva. Una segunda señal controla la región que da lugar al abdomen, y la tercera controla el desarrollo de las estructuras de los extremos terminales de la larva.

De los gradientes morfogenéticos creados por estas señales el más sencillo lo constituye cierta proteína; Bicoid, así se llama el polipéptido en cuestión, determina el patrón de la parte anterior de la larva. Con Wolfgang Driever descubrí que había un gradiente de concentración de Bicoid en el embrión de *Drosophila* desde los estadios más tempranos. La concentración deviene máxima en la cabeza del embrión, para decrecer gradualmente a lo largo del mismo. Las hembras de *Drosophila* que son mutantes para el gen *bicoid* no desarrollan el gradiente Bicoid. Los embriones que resultan carecen de cabeza y tórax.

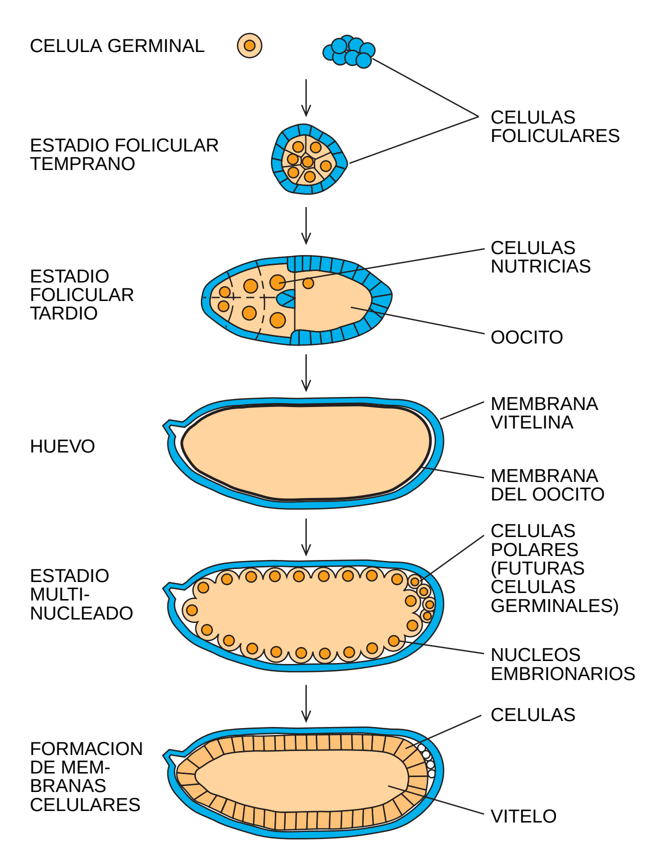
Bicoid actúa en los núcleos del embrión. Dicha proteína constituye lo que se conoce por factor de transcripción; puede, en efecto, iniciar la transcripción de un gen. Aludimos al proceso en virtud del cual se forma ARN mensajero (ARNm) a partir del material genético, el ADN. La célula empleará después el ARNm para sintetizar la proteína correspondiente al gen. Los factores de transcripción operan uniéndose a secuencias de ADN específicas en las regiones de control, o promotores, de los genes diana. Para unirse a un promotor, Bicoid debe hallarse en una concentración superior a cierto umbral.

Driever y yo investigamos la interacción entre Bicoid y cierto gen diana. *Hunchback*, tal era el nombre del gen, se transcribe en la parte anterior del embrión cuando éste comienza a desarrollarse; el promotor del gen contiene varios sitios de unión de Bicoid. Llevamos a cabo dos tipos de experimentos: en uno de ellos cambiamos el perfil de concentración de Bicoid y en el otro cambiamos la estructura del promotor del gen *hunchback*.

Mediante la introducción de copias adicionales del gen *bicoid* en la hembra se obtienen huevos con niveles de Bicoid cuatro veces mayores de lo normal en todo el gradiente. En estos embriones, la región de activación del gen *hunchback* se extiende a regiones más posteriores; la cabeza y el tórax se desarrollan a partir de una zona del embrión mayor de la habitual. En principio, esta anormalidad podría deberse a un mayor empinamiento del gradiente de concentración de Bicoid en los embriones manipulados o a



4. EMBRIONES con copias extra del gen *bicoid* producen gradientes de proteína Bicoid con mayor pendiente. Concomitantemente, se expande la región donde la concentración de Bicoid supera el umbral para la activación de *hunchback*. Si se provoca de manera artificial la elevación del umbral de activación, se acorta la zona de actividad de *hunchback*.



5. EL HUEVO DE *DROSOPHILA* se construye a partir de una célula germinal, con las células nutricias y las foliculares proporcionando nutrientes y otros factores que controlan el desarrollo embrionario. Sólo después de tres horas, cuando hay 6000 núcleos, se forman las membranas. Los tejidos larvarios aparecen más tarde.

unos mayores niveles absolutos de Bicoid. El dilema se resolvió con un experimento en el que creamos embriones mutantes que tenían un nivel de concentración de Bicoid uniforme en todo el embrión, por lo que no existía gradiente. Estos embriones sólo producen un tipo de estructura anterior (cabeza o tórax); el tipo de estructura formada depende de la concentración de Bicoid. El experimento demostró, por ende, que era la concentración absoluta de Bicoid (no la pendiente del gradiente) lo que importaba para controlar el desarrollo subsecuente de cada región.

En el segundo tipo de experimento no se cambió el gradiente de Bicoid, aunque sí se alteró la región del promotor del gen *hunchback*. Cuando el promotor alterado se unía sólo débilmente a Bicoid, se requerían concentraciones mayores de Bicoid para iniciar la transcripción del gen *hunchback*. Como resultado, el límite posterior de la zona de actividad del gen *hunchback* se desplazaba anteriormente. En estos embriones, como se podría esperar, la cabeza se forma a partir de una región menor de lo normal. Del experimento se desprendía que Bicoid ejerce su efecto uniéndose al promotor de *hunchback*.

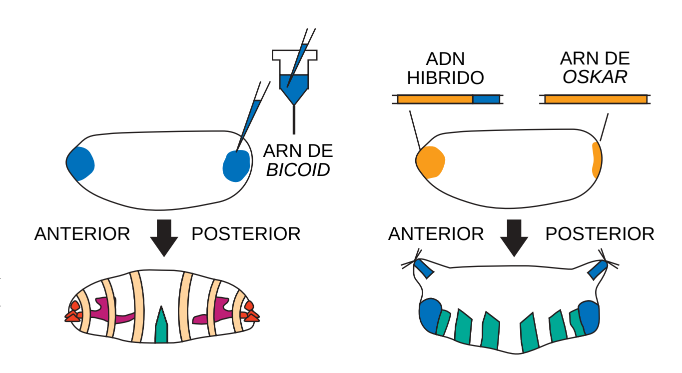
Tales resultados nos revelan que un morfógeno como Bicoid puede determinar la posición de activación de un gen en el embrión modulando su afinidad por dicho gen, en este caso *hunchback*. En teoría, muchos genes diana podrían responder a diferentes niveles dentro del gradiente de un solo morfógeno, produciendo muchas zonas distintas de activación génica. En la realidad, sin embargo, un gradiente suele actuar de manera directa sobre no más de dos o tres genes, por lo que especifica sólo dos o tres zonas de activación.

¿Cómo se establece el propio gradiente morfogenético de Bicoid? Mientras se desarrolla el huevo sin fecundar, unas células nutricias especiales se conectan con él y depositan ARNm de Bicoid en su extremo anterior. La síntesis de proteína Bicoid, que comienza tras la fecundación, se encuentra, pues, en marcha llegado el momento de la oviposición. Durante el desarrollo del embrión, la proteína se va difundiendo desde su lugar de síntesis, en la zona anterior. Esta región formará la cabeza. Sin embargo, Bicoid es inestable, por lo que su concentración en puntos distantes —es decir, en el extremo de la región que dará lugar al abdomen— nunca alcanza niveles altos. El gradiente de concentración que resulta persiste hasta que se forman las membranas celulares.

Este mecanismo de difusión simple procede con la precisión suficiente para satisfacer los requerimientos del desarrollo normal. Curiosamente, cambios sustanciales en los niveles de Bicoid —hasta el doble o la mitad— dan lugar a larvas de proporciones normales. Al parecer, hay mecanismos que corrigen en estadios posteriores de desarrollo algunos de los errores cometidos en los estadios iniciales. Si se trasplanta ARNm de *bicoid* al polo posterior de un embrión normal, se forma un gradiente de proteína Bicoid adicional, orientado de forma opuesta al gradiente normal. El embrión que resulta muestra otra cabeza donde debería estar el abdomen. Este experimento muestra de forma concluyente que el ARNm de *bicoid* se basta para determinar la polaridad.

En otro trabajo se comprobó que el ARNm de *bicoid* se coloca de forma precisa en la célula huevo. Paul M. Macdonald, de la Universidad de Stanford, ha identificado un fragmento grande del ARNm de *bicoid* que contiene toda la información requerida para que una célula lo reconozca, transporte y ancle. Daniel St. Johnston y Dominique Ferrandon hallaron que el complejo molecular integrado por ARNm de *bicoid* y una proteína llamada Staufen se movía en determinada dirección junto a los microtúbulos, elementos estructurales de la célula. Quizás esto explique la localización del ARNm de *bicoid*, aunque es casi segura la implicación también de otras proteínas.

Así como Bicoid determina la parte anterior de la larva, su parte posterior viene instada por un gradiente morfogenético distinto, que está formado por la proteína Nanos. El ARNm de *nanos* se aloja en el citoplasma de la parte posterior del embrión. Esta disposición depende críticamente de otro complejo molecular, formado por la proteína Staufen y el ARNm de un



6. LOS GRADIENTES que han sufrido una alteración dirigen un desarrollo erróneo. Si el ARN de *bicoid* se añade al extremo posterior de un huevo (*izquierda*), comienzan a desarrollarse una segunda cabeza y tórax. Los huevos diseñados para producir un híbrido de ARN de *oskar* y bicoid (*a la derecha*) desarrollan dos extremos abdominales.



7. EL GRADIENTE de proteína Dorsal crea el eje dorsoventral de *Drosophila* (*tinción oscura*). La proteína se encuentra más concentrada en los núcleos de la parte inferior del embrión.

gen llamado *oskar*. Anne Ephrussi y Ruth Lehmann demostraron el papel crucial de *oskar* mediante la sustitución del fragmento de ARNm requerido para su localización por el fragmento correspondiente del ARNm de *bicoid*. Esa molécula híbrida se comporta como el ARNm de *bicoid*, situándose en el polo anterior y no en el posterior. La manipulación dirigió de manera equivocada el ARNm de *nanos* al polo anterior del embrión, provocando así la formación de un embrión con dos extremos abdominales en simetría especular.

Gradientes a través de membranas celulares

Los mecanismos que crean los gradientes morfogenéticos de Bicoid y Nanos, macromoléculas de notable tamaño, sólo pueden operar cuando no hay membranas celulares que impidan su difusión. En la mayoría de los animales, sin embargo, se generan membranas celulares entre las diferentes regiones del huevo nada más comenzar su desarrollo, razón por la cual estos mecanismos no pueden operar. Es de interés hacer notar, por tanto, que el eje dorsoventral (arriba-abajo) del embrión de *Drosophila*, a diferencia del eje anteroposterior, se define por un gradiente único que puede desarrollarse incluso en presencia de membranas celulares. De lo que se infiere que este mecanismo podría parecerse más a los que operan en otros organismos.

El primer patrón embrionario del eje dorsoventral se determina por un gradiente de una proteína llamada Dorsal. Al igual que Bicoid, Dorsal es un factor de transcripción; controla la actividad de varios genes diana de una forma dependiente de concentración. La proteína Dorsal actúa como un activador transcripcional o como un represor: dentro de los núcleos de la célula activa o reprime genes. Cuando su concentración en el núcleo supera cierto nivel, Dorsal activa la transcripción de un par de genes que desempeñan misiones importantes en el desarrollo posterior. Cuando la concentración disminuye por debajo de cierto nivel, *reprime* la transcripción de dos genes diferentes. Si la concentración de Dorsal en los núcleos se dispone en gradiente, cada uno de estos pares de genes se expresará subsecuentemente en una zona diferente del embrión.

Sin embargo, la formación del gradiente de concentración nuclear de la proteína Dorsal difiere por entero de la formación del gradiente de Bicoid. La concentración total de la proteína Dorsal es, en realidad, la misma en todo el embrión. Christine W. Rushlow y Michael S. Levine, de la Universidad de Columbia, así como mi colega Siegfried Roth y yo, demostramos que lo que varía a lo largo del eje dorsoventral del embrión es la cantidad de proteína Dorsal presente en el núcleo. En la parte dorsal del embrión, la proteína se encuentra principalmente en el citoplasma; en la zona ventral se halla especialmente en los núcleos.

¿Cómo se forma este gradiente peculiar, restringido a los núcleos, de proteína Dorsal? Lo que suele impedir que Dorsal entre en el núcleo es otra proteína, Cactus, a la que se une. En la parte ventral del embrión, sin embargo, Dorsal se libra de dicha unión a través de una ruta de activación en la que están implicadas al menos 10 proteínas.

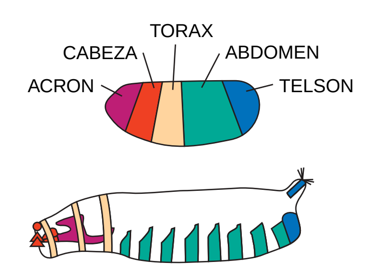
La señal ventral que dispara el proceso se origina en estadios tempranos del desarrollo del huevo, cuando se halla dentro de la hembra. Pese a ello, su efecto —el paso de Dorsal al núcleo— acontece varias horas más tarde, cuando los núcleos de los embriones se encuentran en rápida división. Por tanto, la señal debe ser muy estable. La señal, cuya naturaleza exacta se desconoce, se concentra en la membrana vitelina, que rodea el huevo en la oviposición.

A través de diversos experimentos acometidos por David Stein y la autora, así como por el grupo de Kathryn V. Anderson, de Berkeley, ha quedado establecido que algunos componentes iniciales de esta ruta de activación se producen en las células foliculares de la madre, que rodean el huevo antes de la oviposición. Otros se producen en el oocito y se depositan en el citoplasma del huevo o en su membrana, o bien se secretan en el espacio que rodea al huevo.

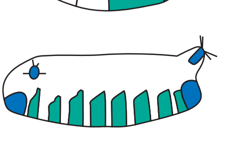
En un comienzo, las proteínas que intervienen en esa ruta están distribuidas uniformemente, instalada cada una en su propio compartimento. Más tarde la señal, que define la parte ventral, se activa. La señal determina el gradiente de Dorsal estimulando una cascada de interacciones entre las proteínas de la ruta de activación; la cascada confiere al huevo la información que determina su región ventral.

Este sistema de transmisión de información se basa, a buen seguro, en sus propios gradientes. Resulta verosímil que se dé ya un auténtico gradiente en el espacio que rodea el huevo, por la sencilla razón de que

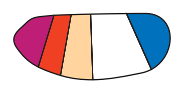
8. LOS GENES QUE ALTERAN el desarrollo temprano de *Drosophila* se agrupan en cuatro clases que dejarán sentir su influencia en distintas rutas. Tres de las clases afectan al eje longitudinal. Para cada una hay partes características del embrión que no se desarrollan. Otra clase (*no se muestra*) afecta al eje dorsoventral.

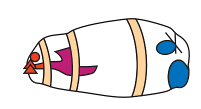




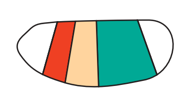




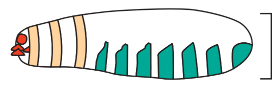


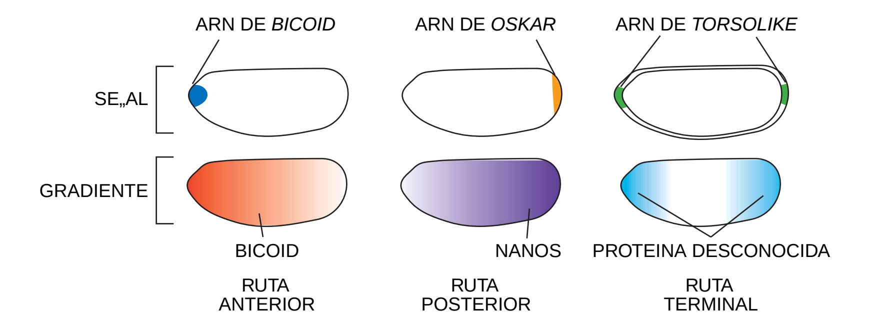












9. TRES RUTAS del eje longitudinal crean señales de ARN de *bicoid*, *oskar* y *torsolike*. Dan lugar a cuatro gradientes de proteína que comienzan a subdividir el embrión.

las proteínas de gran tamaño pueden difundirse fácilmente por dicha región. A esta señal en gradiente se le atribuye la activación gradual de una molécula receptora en la membrana del oocito; es decir, los receptores se hallarán más o menos activos en razón de cuán ventral sea su posición. Los receptores pueden después transmitir una señal graduada similar al citoplasma del huevo, y así sucesivamente.

La señal que inicia la formación del patrón dorsoventral del embrión salva de ese modo el obstáculo contra la difusión. Para ello se basa en un sistema de transmisión de señal que, mediante diversas proteínas, traslada el gradiente de información de un compartimento a otro. (Un mecanismo similar para transmitir una señal a través de la membrana del huevo opera en el sistema terminal, que es el sistema que controla las estructuras en ambos extremos del eje anteroposterior.) De esa manera, pueden transmitirse al interior las señales que proceden del exterior del huevo, donde puede constituirse fácilmente un gradiente por difusión. El resultado final será el paso gradual al núcleo de una proteína que se hallaba en un principio distribuida uniformemente.

Patrones comunes

¿Qué conclusiones cabe extraer de estas investigaciones? Antes de que se identificaran los gradientes, los biólogos suponían que los morfógenos constituirían una clase especial de moléculas con propiedades exclusivas. Nada de eso. En el embrión temprano de *Drosophila*, muchas proteínas "ordinarias" que pueden cumplir diferentes funciones bioquímicas están capacitadas para conferir información posicional.

En algunos casos, tales como el proceso que determina el patrón dorsoventral, un gradiente aparece primero por difusión y después se reproduce en una cadena molecular de información mediante la activación sucesiva de diferentes proteínas. En otros casos, los gradientes tienen efectos inhibidores. El gradiente de Nanos, por ejemplo, reprime el uso por la célula de un tipo de ARNm uniformemente distribuido, creando así un gradiente de orientación opuesta.

En todas las rutas investigadas hasta ahora, el resultado final es un gradiente de morfógeno que funciona principalmente como un factor de transcripción: promueve o suprime la transcripción de uno o más genes diana según una pauta que depende de la concentración. Estos gradientes presentan a veces una pendiente muy suave; las concentraciones de Bicoid y Dorsal disminuyen lentamente a lo largo del embrión. Pese a lo cual, consiguen que las proteínas de sus genes diana tengan zonas de activación con límites muy definidos. ¿Cómo lo logran?

Podría ocurrir ese fenómeno si varias moléculas —diferentes entre sí o copias múltiples de una misma— cooperasen para iniciar la transcripción. El resultado es a menudo una dependencia estricta de la concentración de uno o varios de sus componentes. Es de destacar a este respecto, por tanto, que los genes activados por las proteínas Bicoid o Dorsal contienen muchos sitios de unión adyacentes, a menudo para diferentes factores de transcripción que pueden modular la actividad de estos genes.

Algunos gradientes morfogenéticos, por lo que se aprecia, sólo producen un efecto: si la concentración del morfógeno en un sitio particular supera un umbral crítico, se activa un gen diana; si no es así, no lo hace. En otros casos, las diferentes concentraciones del morfógeno producen respuestas distintas; se trata del tipo de gradiente más importante para incrementar la complejidad durante el desarrollo del organismo.

Aunque cada gradiente morfogenético parece ejercer el control directo de unos cuantos genes diana sólo, las interacciones entre cofactores que afectan a la transcripción pueden cambiar radicalmente la respuesta a los gradientes. Estos mecanismos de regulación combinatoria permiten la formación de patrones de gran complejidad a partir de un sistema inicialmente simple. Las proteínas que actúan como cofactores pueden incidir en la afinidad del morfógeno por la región del promotor del gen, y modificar así, hacia arriba o hacia abajo, el umbral crítico. Un cofactor puede incluso convertir en represor un factor de transcripción activador. La capacidad para crear patrones complejos se incrementa en cuanto admitimos que los cofactores podrían, a su vez, hallarse distribuidos en gradiente.

La superposición de varios gradientes en una región del embrión puede subdividir a ésta aún más y redoblar la complejidad. Las tres rutas que definen el eje anteroposterior del embrión de *Drosophila* dan lugar juntas a cuatro gradientes distintos e independientes (la ruta terminal produce dos gradientes, de una proteína desconocida). Cada gradiente tiene uno o dos umbrales. De esta forma, la combinación única de la expresión de genes diana define al menos siete regiones. En el extremo anterior, donde se traslapan el gradiente de una proteína terminal todavía desconocida y el gradiente de Bicoid, la combinación determina el desarrollo de la región más anterior de *Drosophila*, que origina parte de la cabeza. El gradiente de la proteína desconocida por sí solo, en cambio, produce estructuras del extremo opuesto, la parte terminal del abdomen.

La formación de patrones mediante una regulación combinatoria se hace más evidente en estadios más avanzados del desarrollo de la mosca del vinagre. Así, los gradientes de factores de transcripción del eje antero-posterior del embrión afectan a genes que, en la mayoría de los casos, codifican otros factores de transcripción. Estos factores secundarios, a su vez, se difunden para formar gradientes propios. En los distintos umbrales de concentración cada factor actúa sobre sus propios genes diana; a veces, estos umbrales se alteran por otros factores de transcripción con dominios de acción solapantes.

La conjunción de dependencia de concentración y regulación combinatoria crea un amplio repertorio de mecanismos de formación de patrones

que permiten realizar los diseños codificados por los genes. En *Drosophila*, los patrones iniciales generan bandas transversales de expresión génica que ocupan la parte del huevo que formará la región segmentada de la larva.

Este patrón dirige, a su vez, la formación de un patrón bandeado todavía más refinado, que determina directamente las características de cada segmento embrionario. En cuanto el embrión entra en el estadio de múltiples células segregadas, los factores de transcripción no pueden difundirse ya por las distintas capas celulares. Los últimos pasos de refinamiento del patrón descansan, pues, en señales entre células vecinas, probablemente mediante mecanismos especiales que transmiten las señales a través de las membranas celulares.

Quedan todavía por resolver muchos puntos oscuros antes de poder ofrecer una visión completa del desarrollo del embrión de *Drosophila*. Pero conocemos ya sus grandes líneas. Este hito en que hemos intervenido puede arrojar mucha luz sobre el dominio de la zoología; en efecto, una de las grandes sorpresas de los últimos cinco años ha sido el descubrimiento de la extraordinaria similaridad en los mecanismos básicos que operan en el desarrollo temprano de distintos animales, mecanismos que trabajan con genes y factores de transcripción también muy parecidos.

La investigación básica realizada en un organismo particularmente idóneo nos ha llevado a descubrimientos importantes que permitirán algún día entender el desarrollo humano. De momento tales estudios han proporcionado ya una respuesta satisfactoria a una de las preguntas más profundas concernientes a la naturaleza: ¿cómo surge la complejidad a partir de una simplicidad inicial?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MAKING OF A FLY; THE GENETICS OF ANIMAL DESIGN. Peter A. Lawrence. Blackwell Science, 1992.

THE ORIGIN OF PATTERN AND POLARITY IN THE *DROSOPHILA* EMBRIO. Daniel St. Johnston y Christiane Nüsslein-Volhard en *Cell*, vol. 68, n.º 2, págs. 201-209; 24 de enero de 1992.

THE DEVELOPMENT OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*. Dirigido por Michael Bate. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1993.

Tim Beardsley

SHELLEY A. HARRISON: *el futuro de una empresa espacial*

Ya se van dispersando las volutas de humareda amarilla que ha dejado el *Endeavour* en el cielo mañanero de Cabo Cañaveral. Shelley A. Harrison, cuya compañía ha depositado gran parte de sus bienes muebles en la bodega del transbordador, está radiante y rezuma seguridad. Harrison, director general de Spacehab, habla de la aurora de la actividad comercial en el espacio. "El hombre habitará en el espacio. Para conseguirlo se ha creado Spacehab", declara.



Su discurso, académicamente preciso, revela un pasado universitario. Su carrera en el mundo de los negocios, empero, no ha sido menos brillante. En su haber cuenta la fundación de la empresa que contribuyó a establecer los códigos de barras que adornan los productos de consumo. Ahora, Harrison está convencido de que la órbita terrestre constituye un lugar prometedor para el progreso de la técnica. Y en ese sentido se esfuerza por vencer las reticencias de las grandes compañías.

Admite que no han abundado las posibilidades de colocar una carga en órbita. Pero esa tendencia la va a quebrar el Spacehab con su ofrecimiento a los potenciales clientes de módulos de laboratorio incorporados en la bodega del transbordador espacial. La compañía, que alquila a la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) la bodega del transbordador, ha ganado un contrato para llevar suministros a la estación espacial rusa *Mir*. Harrison acaricia una meta a largo plazo mucho más ambiciosa: privatizar las operaciones a realizar en la futura Estación Espacial Internacional.

Sus padres querían que fuera rabino. Se aplicó al estudio del Talmud y lógica, que le "enseñaron a pensar en múltiples niveles". Pero le atraía la física, que empezó en Israel, y la NASA le concedió una beca para licenciarse en ingeniería electrónica. Con el título en el bolsillo, entró en los laboratorios AT&T Bell para investigar en matrices de radares en fase.

Mientras preparaba, en los años sesenta, su doctorado en el Politécnico de Brooklyn, Harrison tuvo la oportunidad de observar de cerca la firma Quantronix, que luchaba, sin mucho éxito, por desarrollar láseres para aplicaciones exóticas. La experiencia le enseñó una importante lección de negocios. "Me di cuenta de que si yo alguna vez me hubiera puesto a eso —crear una compañía de láseres— habría buscado un mercado amplio, no pequeños nichos."

Defendida la tesis, se le contrató como profesor en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Se le asignó la elaboración de los programas de electrónica cuántica. Aprendió el arte de los proyectos subvencionados y constituyó una entidad sin ánimo de lucro, Public Systems Research, para que graduados y profesores pudieran completar sus ingresos. Entre los clientes se encontraba la NASA, que estaba diseñando experimentos de combustión para las misiones Skylab, y el Universal Product Code Council, una organización que buscaba la manera de presentar a una máquina información legible sobre los productos.

A principios de los setenta, la cantidad de datos que las cajeras de los supermercados introducían en las máquinas registradoras no paraba de crecer, pero lo seguían haciendo a mano y cometían muchos errores. Harrison advirtió que los láseres podrían constituir los "ojos de los ordenadores" de un sistema automatizado. Se juntó con Jerome Swartz para fundar Symbol Technologies y "conquistar luego el mundo".

El objetivo de Symbol era desarrollar lectores láser portátiles de códigos de barras, pero antes tenía que haber códigos de barras que leer. Harrison y Swartz, a los que más tarde se unió Susanne, la mujer de Harrison, empezaron con un aparato controlado por ordenador para imprimir códigos de barras en una banda que incorporaban en los envoltorios. Symbol introdujo un lector láser manual conectado a una estación fija que los empaquetadores podían usar para comprobar la lectura de los códigos de barras.

Symbol automatizó primero las empresas distribuidoras de revistas con un código mejorado que permitía que las máquinas leyeran la fecha de los números de la revista. Los inventores perfeccionaron más tarde los lectores portátiles que desde entonces han invadido las tiendas de discos, las librerías y los grandes almacenes.

La compañía les supuso "una tonelada de dinero" a los inversores tras su oferta pública en 1979. Pero Harrison se sentía más urgido por abrir nuevos caminos para las técnicas avanzadas que por capitanear una empresa floreciente. En 1982 fundó con su mujer la sociedad Harrison Enterprises. A finales de los ochenta creó con Herman Fialkov y otros Poly Ventures, cuyos fondos se invertían en jóvenes compañías de semiconductores, láseres y programas de ordenador, varias de las cuales cotizan ahora en bolsa. (En virtud de un acuerdo con la Universidad Politécnica, un millón y medio de sus beneficios han ido a parar a su alma mater.)

En ésas, Harrison había entablado una estrecha relación con Robert Citron, viejo administrador de proyectos internacionales de la Institución Smithsoniana y fundador de Spacehab. Citron le pidió a Harrison su colaboración en un negocio inédito: turismo espacial, idea originaria que más tarde evolucionó en alquiler de espacio de laboratorio en órbita. Hasta ahora las compañías aeroespaciales pujan por la contratación de suministros e infraestructura. Spacehab partió de un plan más ambicioso: la compañía sería la dueña de su material y se lo alquilaría al gobierno.

Pensaban en un comienzo los responsables de la NASA que el transbordador espacial ceñiría su misión a transportar carga hasta la estación espacial. No se les ocurrió, pues, la posibilidad de acometer experimentos a bordo. Pero cuando se vio que la estación sufriría un notable retraso, Harrison y Citron acariciaron la idea de realizar investigaciones en laboratorios modulares instalados en la bodega de la nave. Los astronautas podrían acceder de la cabina a los módulos a través de un túnel. Citron supuso que ahorrándose toda la burocracia innecesaria, una empresa privada podía proporcionar módulos por menos dinero que la NASA.

Harrison les expuso la idea a empresarios aerospaciales, que elogiaron la propuesta pero declinaron invertir.

Su discurso, académicamente preciso, revela un pasado universitario. Su carrera en el mundo de los negocios, empero, no ha sido menos brillante. En su haber cuenta la fundación de la empresa que contribuyó a establecer los códigos de barras que ahora adornan los productos de consumo

En 1987, Citron convenció a Harrison, que ya había comprometido parte de su propio dinero en Spacehab y tenía un puesto en el consejo de administración, para que se dedicara a recabar fondos. Habían hecho sus números: los tres primeros módulos de laboratorio (la cifra mínima deseable) costarían más de 120 millones de dólares. Harrison encontró eco en Europa (Daimler-Benz y Alenia Spazio han invertido) y en el Lejano Oriente (Mitsubishi, algunos acaudalados inversores taiwaneses y las empresas del gobierno de Singapur poseen participaciones considerables).

Pero la empresa estaba todavía lejos del objetivo cuando un estudio encargado por la NASA llegó a la conclusión de que se necesitaban 1200 millones de dólares para construir un ingenio espacial con las prestaciones que Spacehab ofrecía por 185 millones. Spacehab ganó el contrato y obtuvo el capital que faltaba. Harrison llegó a presidente en 1993, el año del primer vuelo de Spacehab. La misión *Endeavour* de mayo último era la cuarta de un módulo de laboratorio Spacehab y la quinta de la compañía (un módulo de almacenamiento había llevado antes suministros a la *Mir*, este mismo año).

Harrison negocia ahora plazas para los módulos Spacehab en el programa de lanzamientos que baraja la NASA. Una pequeña reorganización de los cargamentos de los transbordadores espaciales, mantiene, puede dejar sitio libre para vender a las compañías, así como a los socios de la NASA en la Estación Espacial Internacional a fin de que comprueben sus equipos. Spacehab ha presentado recientemente un nuevo módulo doble que aumenta las posibilidades. Harrison se burla de esos científicos académicos que desdeñan la investigación en el espacio pero que nunca han arriesgado su dinero. "Si hubiera escuchado lo que dicen esos aguafiestas sobre las posibilidades de sacar de la técnica provecho económico para mis empresas, nunca me habría embarcado en ninguna de ellas."

Aunque durante el pasado decenio se realizó investigación comercial en el espacio esporádicamente, no se comenzó "en serio" hasta el primer vuelo de Spacehab. Resulta, pues, llamativo que en 1995 la industria y las instituciones académicas hayan aportado 38 millones de dólares en efectivo y "en especie" (lo que incluye materiales) para la investigación espacial comercial. La NASA contribuyó con aproximadamente la mitad de esa suma y proporcionó lanzamientos gratuitos.

Ve como un signo optimista que haya 100 compañías registradas como afiliadas a la NASA para el comercio espacial, así como las patentes que guardan relación con el espacio: cinco concedidas y 11 solicitadas en 1995. "La investigación comercial en microgravedad realizada hasta la fecha ha demostrado claramente que vale la pena", afirma, señalando su "naturaleza iterativa". Pone como ejemplo Kennametal, una fábrica de herramientas industriales, que ha llevado a cabo cuatro experimentos en módulos Spacehab para conocer mejor la sinterización de aleaciones en fase líquida, así como las actividades orbitales de algunas compañías farmacéuticas que podrían dar lugar a nuevas medicinas. Donde muchos observadores encuentran resultados fragmentarios y un tibio interés, Harrison ve el comienzo de una tendencia.

La impresión de Harrison es que la industria se lanzará a los experimentos en el espacio —y posiblemente a la fabricación incluso— cuando pueda negociar con un interlocutor comercial y asegurarse la disponibilidad de unas instalaciones orbitales normalizadas. "De la manera que trabajamos ahora, ¿es viable llevar a cabo una actividad comercial y de investigación en el espacio con algún beneficio aquí abajo? Casi seguro que no", admite. Ahora el empresario se anima al acercarse a su terreno y levanta un poco la voz. "¿Está yendo a mejor? Sí, y pienso que es mérito de Spacehab. ¿Vale la pena, puede salir bien? Sí. Así lo creemos, o no habríamos empeñado nuestro dinero y nuestra empresa."

Ciencia y sociedad

Genética floral

El control de la inflorescencia

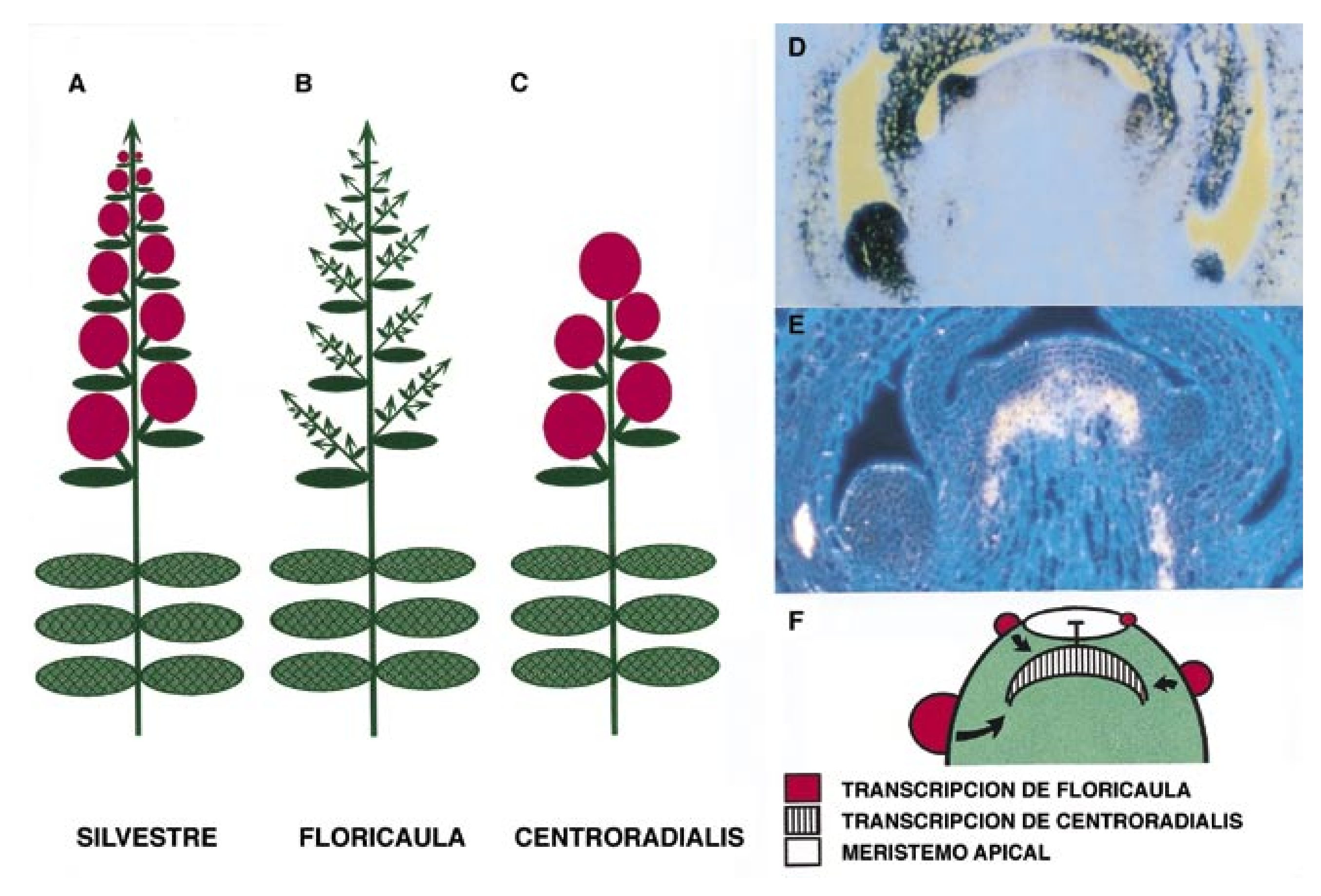
Muchas plantas superiores agrupan sus flores en una región del tallo que recibe el nombre de inflorescencia.

Los patrones de ramificación y distribución de flores de las inflorescencias presentan una variedad sorprendente. Sin embargo, su arquitectura depende básicamente de dos parámetros: la posición en que se forman los nuevos meristemos durante el desarrollo y el tipo de meristemo que se especifica en cada posición. Los meristemos son grupos de células indiferenciadas que se localizan en las zonas de crecimiento de la planta que mantienen la capacidad de dividirse.

Ilustraremos el desarrollo de una inflorescencia tomando como ejemplo la boca de dragón (*Antirrhinum majus*). Durante el crecimiento vegetativo, el meristemo apical del tallo produce, por división, pares de primordios de hojas opuestas. Cada hoja tiene en su axila un meristemo secundario, dotado de capacidad de generar tallos laterales.

Al cabo de un tiempo, bajo la acción de factores ambientales y genéticos, el meristemo apical vegetativo se transforma en un meristemo de inflorescencia y empieza a producir primordios de brácteas (hojas modificadas), dispuestas en espiral y menos espaciadas que los pares de hojas. En las axilas de las brácteas se forman los meristemos florales que, después de producir los primordios de órganos florales (sépalos, pétalos, estambres y carpelos) dispuestos en verticilos, detienen su crecimiento.

El meristemo apical, por el contrario, continúa creciendo y produciendo flores laterales hasta que la planta envejece (*véase la figura 1A*). La inflorescencia de *Antirrhinum* es, pues, *indeterminada*. La boca de dragón



1. Representación esquemática de las inflorescencias típicas de Antirrhinum *silvestre* (A)*, mutante* flo (B) *y mutante* cen (C)*. La flor terminal de* cen *se desarrolla antes que las laterales. Se muestran secciones de inflorescencias de* Antirrhinum *hibridadas con ARN complementario al ARNm de* flo (D) *y* cen (E)*. En* D*, la señal de hibridación, que aparece en azul, se ubica en las regiones donde hay ARNm de* floricaula*, meristemos florales y brácteas. En* E *la señal de hibridación de* cen *aparece en blanco en la región subapical de la inflorescencia. En* F *se ilustra el modelo de regulación recíproca de* flo *y* cen*: el gen* flo *se expresa en los meristemos laterales y activa* (flechas) *la transcripción de* cen *en la región subapical. El gen* cen *impide a su vez la expresión de* flo *en el meristemo apical.* D *y* E *cedidas por E. Coen y R. Carpenter*

difiere así de otras plantas cuyo meristemo apical termina por transformarse en una flor terminal y que reciben el nombre de *determinadas*. Los genes que controlan temporal y espacialmente la aparición de los distintos tipos de meristemos y primordios definen, en última instancia, la arquitectura de la inflorescencia.

Los genéticos deducen la función de un gen estudiando individuos en los que dicho gen no funciona normalmente (mutantes). Las alteraciones encontradas en los mutantes ayudan a averiguar en qué procesos es necesario que el gen funcione bien para que éstos se lleven a cabo con normalidad. De esta forma se descubrió y caracterizó por primera vez un gen implicado en el desarrollo de una inflorescencia: *floricaula*. E. Coen y R. Carpenter encontraron en su laboratorio del Instituto John Innes de Norwich (Reino Unido) un mutante de *Antirrhinum*, *floricaula* (*flo*) cuya inflorescencia estaba alterada.

Los mutantes *flo* tienen un desarrollo vegetativo normal y, en su fase reproductiva, el tallo adquiere las características típicas de inflorescencia (brácteas en espiral poco espaciadas). Sin embargo, en las axilas de las brácteas no se forma un meristemo floral, sino otro tallo de inflorescencia. En las axilas de las brácteas de esta inflorescencia secundaria aparecen nuevos tallos de inflorescencia y el proceso se puede reiterar, una y otra vez, para originar una planta muy ramificada que nunca produce flores (*véase la figura 1B*). Como las plantas mutantes para *floricaula* nunca producían flores, estos investigadores dedujeron que el gen *floricaula* normal (o silvestre) era necesario para especificar meristemos florales.



2. Inflorescencia de un Antirrhinum *mutante* centroradialis. *La inflorescencia tiene menos flores que la silvestre ya que el meristemo apical, que en plantas silvestres continúa creciendo de un modo indeterminado, se transforma en una flor terminal. Obsérvese que las flores laterales tienen simetría bilateral y la flor terminal simetría radial. Cedida por E. Coen y R. Carpenter*

El gen *flo* silvestre estaría, por tanto, implicado en la activación del programa floral. En este programa intervienen varios procesos: activación de los genes que confieren identidad a los órganos florales, cambio de disposición de los primordios (de espiral a verticilada), acortamiento de la distancia entre primordios y transformación del meristemo indeterminado en determinado. Tras lograr la clonación de *flo*, pudo comprobarse que su patrón de expresión era compatible con las funciones arriba señaladas (*véase la figura 1D*). El gen *flo* silvestre se transcribe en los primordios florales desde el principio de su desarrollo. De hecho, constituye el marcador que permite identificar en fase más temprana los meristemos florales como tales, cuando aún no pueden distinguirse de otros meristemos.

Pero la arquitectura de la inflorescencia de *Antirrhinum* se altera también con el gen mutante *centroradialis* (*cen*). Los mutantes *cen* tienen una inflorescencia determinada. Después de producir un pequeño número de flores laterales, el meristemo apical se transforma en una flor, terminando así el crecimiento de la inflorescencia (*véanse las figuras 1C y 2*).

Los mutantes *cen* exhiben, pues, un fenotipo opuesto al de los mutantes *flo*. No tenemos ya una inflorescencia muy ramificada que crece indefinidamente y nunca produce flores, sino una planta cuyo crecimiento se interrumpe muy pronto y con flores en posiciones donde nunca aparecen en plantas silvestres. En plantas con un gen *cen* mutante, el gen *flo* se transcribe fuera de lugar en el meristemo apical y pone en marcha el programa floral, razón por la cual el meristemo apical se transforma en una flor. En plantas silvestres, el gen *cen* normal evita la expresión de *flo* en el ápice y por eso la inflorescencia sigue creciendo indefinidamente.

El gen *cen*, estudiado asimismo en el laboratorio de Coen y Carpenter, se transcribe en la región subyacente bajo el meristemo apical de la inflorescencia (*véase la figura 1E*). Se comprobó que la transcripción de *cen* depende de *flo*: en los mutantes *flo* no se detecta ARNm de *cen*. Esto ha llevado a elaborar un modelo que implica un control recíproco de *cen* y *flo* (*véase la figura 1F*). Después de la inducción floral, *flo* se expresa en los meristemos laterales de la inflorescencia y activa a *cen*; la activación de éste impide la expresión de *flo* en el meristemo apical, gracias a lo cual la inflorescencia continuará creciendo de forma indefinida.

Dado que *cen* y *flo* no se transcriben en las mismas regiones de la inflorescencia, uno y otro deben ser capaces de ejercer su acción a distancia. Las proteínas codificadas por estos genes se transportan a través de las células o generan una señal que se transmite de una célula a otra. Todavía no está clara la función bioquímica de las proteínas codificadas por estos genes, aunque la secuencia de la proteína Flo tiene características de factor de transcripción y el polipéptido Cen podría intervenir en la comunicación celular.

Se han identificado genes similares a *flo* y caracterizado mutantes que recuerdan a los mutantes *flo* y *cen* en otras especies, algunas de ellas muy alejadas, desde el punto de vista filogenético, de *Antirrhinum*. Es probable, pues, que el ancestro común de todas ellas poseyera ya genes como éstos con similares funciones. Si así fuera, el modelo que acabamos de describir podría extenderse y alcanzar una aplicación más general.

Las variaciones en el tiempo y lugar de expresión de genes simila-

res a *flo* y *cen* podrían ser en parte responsables de la amplia gama de arquitecturas que nos ofrecen las inflorescencias de las plantas actuales. Si *flo* sólo se activa después de que la inflorescencia produzca ramificaciones, el resultado no será una inflorescencia simple, sino compuesta. Si *cen* no se expresa en el meristemo apical, *flo* se expresará allí y la inflorescencia no tendrá un crecimiento indeterminado, sino determinado. Si *flo* se expresa en el meristemo apical antes que en los laterales, la inflorescencia crecerá en zigzag, en vez de tener un solo eje de crecimiento. Todo ello dependerá de los genes, hoy desconocidos, que controlan temporal y espacialmente la expresión de *flo* y *cen*.

Otro interesante aspecto de estos estudios es su posible aplicación biotecnológica. La floración constituye un proceso que exige una enorme inversión de nutrientes y conlleva un retraso en el desarrollo de otros órganos de la planta. La sobrexpresión de *cen* en col, lechuga, remolacha y otras hortalizas impediría su floración y encaminaría los nutrientes hacia las partes comestibles, favoreciendo su desarrollo. Por otro lado, la sobrexpresión de *flo* adelantaría la floración o daría lugar a la aparición de un mayor número de flores. Este experimento ya ha sido realizado por D. Weigel, en el Instituto Salk, y M. Yanofsky, en la Universidad de San Diego, quienes han creado *Arabidopsis* transgénicas en las que se expresan en abundancia *leafy* (un gen similar a *flo* en *Arabidopsis*) y *apetala 1* (otro gen de función comparable a *leafy*), respectivamente.

Las plantas transgénicas florecen mucho antes que las silvestres, sus inflorescencias laterales están sustituidas por flores únicas y el meristemo apical produce una flor terminal que acaba prematuramente con el crecimiento de la planta. Weigel ha introducido también, por manipulación genética, *leafy* en el álamo, árbol que florece a los ocho años de vida. Los álamos transgénicos de Weigel florecen a los cinco meses. Al adelantar la floración de plantas leñosas, podrían acelerarse en gran medida los programas de mejora. La inducción floral precoz también permitiría determinar tempranamente el sexo de plantas en las que sólo las femeninas producen cosechas.

PILAR CUBAS
Instituto John Innes,
Norwich, Reino Unido

Vida en Marte

Pros y contras

"Nuevo indicio de vida en el espacio. Los meteoritos encierran organismos unicelulares fósiles diferentes de todos los conocidos en la Tierra", destacaba el titular del *New York Times*. "Ahí fuera hay algo", insistió el semanario *Newsweek*. Respetables científicos comentaron a nubes de periodistas que su trabajo, publicado en una prestigiosa revista, revelaba complejos hidrocarburos y lo que parecía una bacteria fosilizada y sepultada en las profundides de un meteorito. Se trataba, proclamaron con seguridad, de "la primera prueba física de la existencia de vida fuera de nuestro planeta".

Ocurría eso en 1961. El meteorito en cuestión no era el de Marte que ha aparecido recientemente en los titulares, sino otro que había caído un siglo antes en Orgueil, Francia. Sometida a un examen más riguroso, la prueba que creíase contundente terminó siendo rechazada por la ciencia. La materia orgánica y los "fósiles" resultaron ser polen de una mala hierba y ceniza de un horno.

Nada tiene, pues, de particular que los expertos hayan recibido con un punto de escepticismo las atrevidas conclusiones a que llega el equipo que encabeza David S. MacKay, del Centro Espacial Johnson de la NASA, y que han aparecido en la revista *Science*. En su opinión, las peculiares características que hallaron en el meteorito ALH84001 se explican perfectamente por la existencia de vida primitiva en Marte hace muchísimo tiempo. Para otros investigadores, los elementos de prueba admiten explicaciones distintas. "Hay interpretaciones no biológicas de los datos de McKay que son mucho más probables", aduce Derek Sears, director de la revista *Meteorites and Planetary Science*.

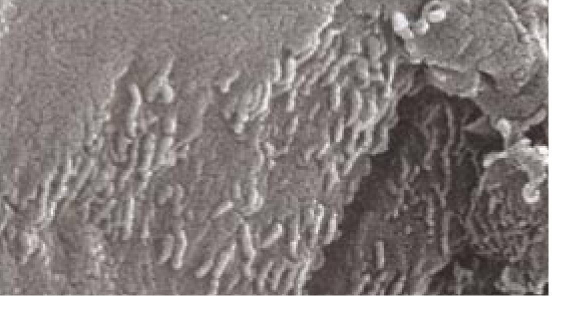
Evidentemente, los datos relativos al ALH84001 son impresionantes: nacido hace 4500 millones de años en las profundidades de Marte; rebotado por un enorme impacto al espacio interplanetario, donde vagó a lo largo de 16 millones de año; capturado por la gravedad terrestre y arrastrado hasta el interior de la nieve antártica; sepultado en el hielo durante 10 o 20 milenios hasta 1984, en que los cazadores de meteoritos lo recogieron y lo lanzaron a la fama. Hasta ahí, todo el mundo está de acuerdo; la controversia se centra en la historia interna, menos espectacular, de la roca.

El grupo de McKay funda su tesis partidaria de la vida marciana en cuatro clases de indicios. La primera son unas manchas, a la manera de puntos ortográficos, que salpican las grietas y hendiduras que perforan la brillante corteza del meteorito. Esas formaciones en multicapa, llamadas rosetas de carbonato, suelen tener núcleos ricos en manganeso, rodeados por una capa de carbonato de hierro y, luego, por una costra de sulfuro de hierro. Las bacterias producen en los estanques rosetas similares al metabolizar minerales. Pero "no es menos razonable esperar también una secuencia así en un medio químicamente cambiante", opone Kenneth H. Nealson, biólogo de la Universidad de Wisconsin.

La segunda clase de indicios se centra en el descubrimiento de ciertos



1. La superficie de Marte no mostró signos de vida cuando la examinó el vehículo Viking *que se posó en ella, pero las condiciones pudieron haber sido mucho más favorables hace miles de millones de años*



2. *¿Animal, vegetal o mineral marciano?*

compuestos orgánicos en el carbonato o a su alrededor. Se trata de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Richard N. Zare, químico de la Universidad de Stanford y coautor del artículo de *Science*, señala que la roca contiene una mezcla poco habitual de HAP de bajo peso molecular. "Sumados a los demás datos, lo más probable es que procedieran de los productos de descomposición de algo que en tiempos estuvo vivo", insiste.

Los críticos, no obstante, sugieren otras explicaciones. "La síntesis hidrotérmica podría tomar carbono inorgánico y agua y fabricar productos orgánicos aromáticos; se obtendrían los mismos que ellos encuentran", indica Bernd Simoneit, químico de la Universidad estatal de Oregón. "Fíjense en el meteorito de Murchison, que se cree proviene del cinturón de asteroides", añade Everett Shock, de la Universidad Washington. "Se han identificado en él cientos de compuestos orgánicos, incluyendo aminoácidos y compuestos más próximos a las cosas que los organismos realmente emplean. Tiene también minerales carbonatados y pruebas sólidas de la existencia de agua. Y, sin embargo, a nadie se le ocurre decir que hay vida en el cinturón de asteroides."

Aplicando microscopios electrónicos de alta potencia al ALH84001, el grupo de McKay halló su tercera prueba, la más convincente: cristales diminutos de magnetita y sulfuro de hierro en forma de lágrima inmersos en lugares donde el carbonato se ha disuelto ante la probable presencia de algún ácido. Los autores observan que ciertas bacterias fabrican cristales de magnetita y sulfuro de hierro semejantes. Joseph Kirschvink, biominerólogo del Instituto de Tecnología de California, está de acuerdo en el carácter desconcertante de tales formaciones minerales. "Si no es biología, me siento incapaz de explicar de qué demonios se trata", confiesa. "No sé de ninguna otra cosa que pueda crear cristales como esos." Shock sigue sin convencerse. "Hay otras maneras de obtener esas formas. Y, en cualquier caso", continúa, "la forma es uno de los peores criterios que pueden usarse en geología para definir las cosas."

El indicio final es el que ha provocado las reacciones más duras. Examinando en el microscopio electrónico fragmentos de ALH84001, McKay halló estructuras alargadas y ovales en el interior de los carbonatos; los consideró nanoorganismos. Pero otros expertos dudan de que tales organismos existieran ni siquiera en la Tierra, no digamos fuera. Sin olvidar el peligro siempre acechante del sesgo del observador.

"El problema", expone Jack Farmer, exobiólogo de la NASA, "es que a esa escala de decenas de nanómetros, los minerales pueden crecer en formas que son virtualmente imposibles de distinguir de nanofósiles". Pero Everett K. Gibson, otro de los colaboradores de McKay, responde que "nosotros eliminamos esa posibilidad en la mayoría de nuestros ejemplos comprobando la falta de crecimiento de caras cristalinas" y otras características mineralógicas.

Algunos críticos también encuentran difícil reconciliar el pequeño tamaño de los "fósiles" con otras pruebas. "Esas estructuras contienen una milésima parte del volumen de la menor de las bacterias terrestres", objeta Carl R. Woese, de la Universidad de Illinois, y estudioso de la química de la vida primitiva. "Van mucho más allá del umbral inferior admitido para el tamaño de una entidad viva", asegura. Además, las pretendidas bacterias marcianas apenas si superan los cristales minerales que, se supone, han producido.

Pero, si no es a través de la vida, ¿cómo explicar ese insólito manojo de caracteres? Algunos hablan de procesos hidrotérmicos. "Imaginemos fluidos calientes que emergen de la corteza", sugiere John F. Kerridge, de la Universidad de California en San Diego (UCSD). "Es perfectamente verosímil la cristalización de la magnetita, sulfuros de hierro y carbonato al cambiar las condiciones químicas a lo largo del tiempo. Si hay HAP bajo la superficie de Marte, este fluido los transportaría y se depositarían en el lugar de cristalización de dicho flujo. Creo que las nanoestructuras son con toda probabilidad una insólita textura de la superficie, resultante del modo en que cristalizó el carbonato."

Tampoco se deja de lado el fantasma de la contaminación. Jeffrey Bada, de la Institución Oceanográfica Scripps de La Jolla, recuerda que se han encontrado HAP en los hielos glaciares, aunque en concentraciones muy bajas; cuando analizó un meteorito marciano diferente, halló que los aminoácidos terrestres se habían introducido en la roca. McKay y sus colegas trataron de evitar ser engañados por los contaminantes llevando a cabo las mismas pruebas en varios meteoritos antárticos. Mostraron, entre otras cosas, que no había ser viviente alguno dentro de ALH84001 en la época en que fue analizado, que la mayor parte (aunque no todos) de los carbonatos alojaban isótopos asociados con Marte y que los HAP estaban más concentrados dentro de la roca que en su superficie. "Esos argumentos son simplistas y poco sólidos", rebate Sears. "La erosión por la intemperie es un proceso irregular. Las cosas se lixivian unas veces hacia dentro, otras hacia fuera. Nunca hacen lo que parece obvio."

Ha comenzado la búsqueda de respuestas más fundamentadas. Investigadores procedentes de muy diversas disciplinas han solicitado muestras del meteorito ALH84001 y de los otros once marcianos. Zare se propone estudiar los aminoácidos y comparar después el carbono 13 de los HAP con el de Marte: un trabajo que algunos piensan debería haber realizado antes de publicar sus resultados. McKay ha hablado de obtener micrografías electrónicas de finísimos cortes de los nanofósiles, pero tal empeño sobrepasa los límites de las posibilidades actuales de la técnica.

Aun cuando los resultados se confirmaran, estaríamos sólo ante la punta del iceberg. "Mi impresión es que la vida bacteriana existe, por lo menos, en los planetas en órbita alrededor de una de cada 10 estrellas", aventura Stanley Miller, de la UCSD. "Yo no consideraría la vida en Marte como una sorpresa, sino como una nueva frontera."

W. WAYT GIBBS
Y COREY S. POWELL

Ciclo celular

Regulación de las ciclinas de G1

Se denomina ciclo celular al conjunto de sucesos que conducen a la división de una célula. En el ciclo celular se distinguen cuatro

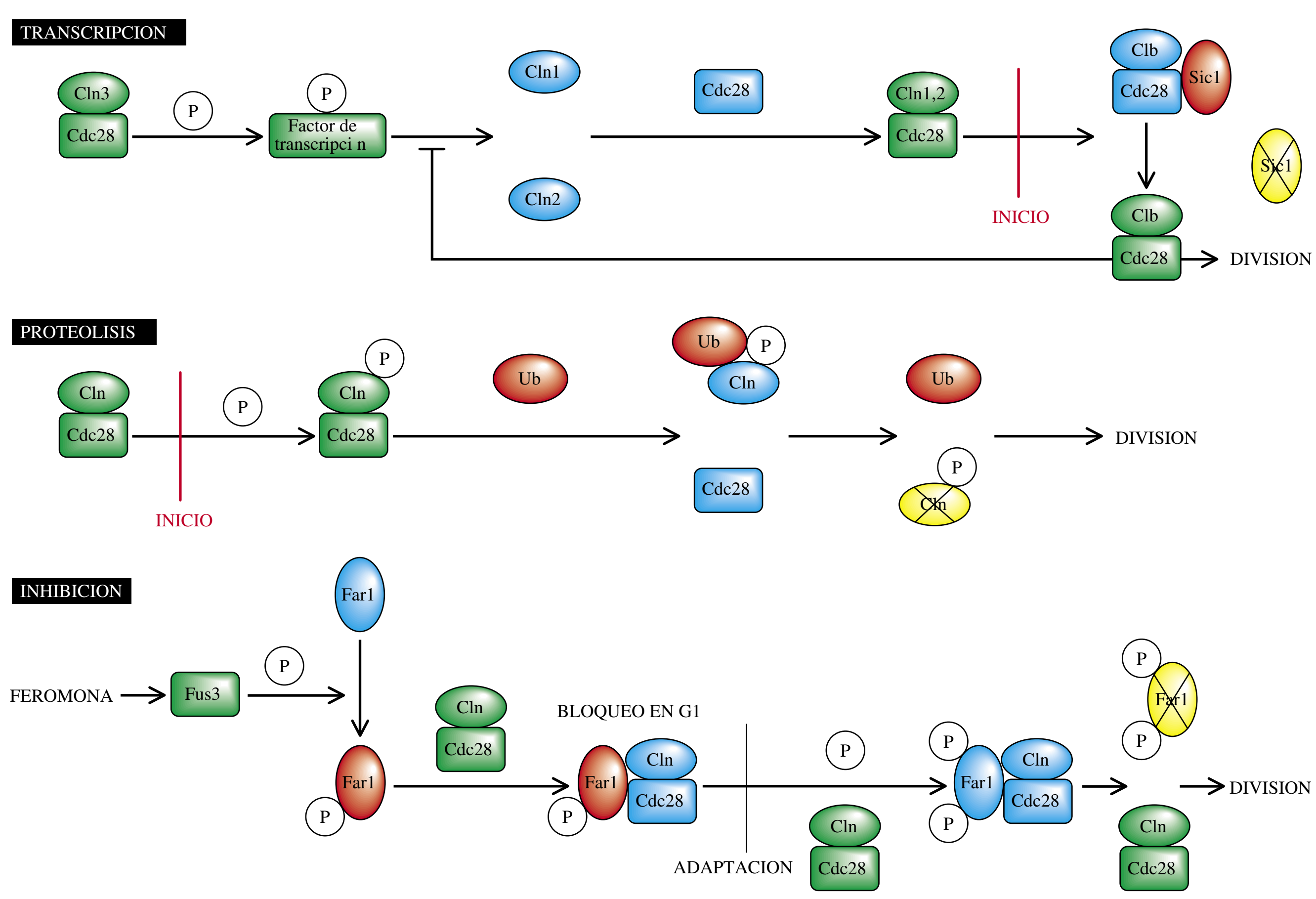
fases sucesivas: G1 (de *G*ap, vacío), S (duplicación del ADN), G2 y M (mitosis). En todos los eucariotas estudiados, el control de estas fases se lleva a cabo mediante la unión de ciertas enzimas a distintas subunidades reguladoras, denominadas ciclinas. Las enzimas en cuestión son quinasas CDK (de *C*yclin *D*ependent *K*inase).

Existe un momento crucial en la fase G1 llamado inicio (*Start*). Se trata de un punto de restricción, de no retorno. Una vez que las células lo han traspasado, están programadas para concluir un ciclo completo. En él, pues, debe asegurarse que las condiciones internas o las ambientales sean favorables para la división; nada tiene de extraño, en consecuencia, que sea allí donde actúen gran parte de los mecanismos que controlan el ciclo celular. Muchos de estos mecanismos operan regulando directamente las ciclinas de G1.

En buena medida, cuanto sabemos acerca de la regulación de estas ciclinas lo hemos aprendido a través de los estudios sobre la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. En este organismo eucariota, el gen *CDC28* determina la CDK que regula el ciclo celular. La proteína Cdc28 se une a las ciclinas de G1 (denominadas Cln y codificadas por los genes *CLN1*, *CLN2* y *CLN3*), para promover la transición de la fase G1 a la fase S, y a las ciclinas mitóticas, o de tipo B (denominadas Clb y cifradas por los genes *CLB1* hasta *CLB6*), para promover la fase S y el paso de G2 a la fase M. Los polipéptidos Cln1, Cln2 y Cln3 son ciclinas parcialmente redundantes, esenciales para pasar el instante "inicio"; deben sintetizarse *de novo* en cada ciclo celular. Hay tres mecanismos de regulación que aseguran su correcto funcionamiento: transcripción, proteólisis e inhibición.

Empecemos por la transcripción, o proceso mediante el cual la información contenida en el ADN se transfiere a una secuencia de ARN complementaria. El ARN mensajero correspondiente al gen *Cln3* está presente a lo largo de todo el ciclo celular, aumentando ligeramente su nivel en la fase G1. Los genes *CLN1* y *CLN2* se transcriben con llamativa periodicidad, alcanzando su máximo nivel antes de "inicio". La síntesis del ARN mensajero correspondiente a estos dos genes depende de ciertos factores de transcripción que requieren la actividad conjunta de ciclina y polipéptido Cdc28, así como estar fosforilados para ser activos.

Se ha demostrado que los complejos formados por las proteínas Cln3 y Cdc28 bastan para promover la correcta transcripción de las otras dos ciclinas; en razón de ello se acepta que Cln3 es esencial para la transcripción de genes implicados en la transición de G1 a S, mientras que los polipéptidos Cln1 y Cln2 lo son para ejecutar otros sucesos correspondientes a "inicio". Así, los complejos Cln1/Cdc28 y Cln2/Cdc28 median la inactivación del mecanismo de destrucción de las ciclinas mitóticas y también activan la degradación del gen *SIC1* (un



La figura representa esquemáticamente los distintos niveles de regulación de las ciclinas de G1: transcripción (arriba), *proteólisis* (centro) *e inhibición de los complejos ciclina/quinasa* (abajo). *El símbolo P enmarcado en un círculo representa la transferencia de fósforo. Los símbolos verdes indican moléculas activas y los azules, moléculas inactivas. Los inhibidores activos están representados por símbolos rojos; las moléculas destruidas se han marcado con una X en su interior y están representadas por símbolos amarillos. Cln, ciclinas de G1. Clb, ciclinas mitóticas. Ub, ubiquitina*

inhibidor del complejo Clb/Cdc28). Los complejos Clb/Cdc28 activos reprimen la transcripción de los genes *CLN1* y *CLN2* y promueven la fase S. De este modo, de una forma indirecta, las ciclinas de G1 regulan su propia expresión.

Vayamos con el mecanismo de proteólisis, o degradación de las proteínas en sus aminoácidos componentes. El hecho de que las ciclinas se acumulen periódicamente se debe no sólo a que sus ARN mensajeros se transcriban de una manera cíclica, sino también a que son proteínas inestables, con una vida media inferior a 10 minutos. Ciertas formas mutantes, que presentan una mayor estabilidad, acortan la duración de la fase G1 y alteran el tamaño con que las células se dividen.

Hay pruebas experimentales de que las proteínas Cln2 y Cln3 se degradan a través de la ruta de la ubiquitina (un marcador que señala la destrucción de muchas proteínas eucariotas). La fosforilación constituye la señal que identifica a las ciclinas para su reconocimiento por el sistema. La investigación reciente ha demostrado que la quinasa responsable de dicha fosforilación es la propia quinasa Cdc28. De esta forma, los complejos constituidos por ciclina y Cdc28 se autolimitan, habida cuenta de su capacidad para activar la subunidad catalítica.

Por último, el mecanismo de inhibición. Las células haploides de *S. cerevisiae* pueden pertenecer a dos tipos sexuales diferentes: las células *a* o las alfa. Las *a* pueden conjugar con las alfa y formar diploides estables. Estas células haploides secretan unas feromonas que actúan como factores inhibidores del crecimiento, y, en efecto, provocan que las células se detengan en la fase G1. De ese modo, las dos células que entran en conjugación tienen exactamente un contenido haploide de ADN. Pero tal bloqueo no es permanente. Si no ha habido conjugación entre las células, se pone en marcha una serie de mecanismos de adaptación que promueven la reiniciación del ciclo celular.

Las feromonas se unen a receptores instalados en la membrana de las células de tipo sexual opuesto [la feromona de la *a* se une al receptor de la alfa y la feromona de la alfa se une al receptor de la *a*]; ese engarce genera una señal que se transmite, a través de una cascada de quinasas, hasta el factor de transcripción que media la expresión de muchos genes necesarios para el proceso de conjugación. Uno de los factores en cuestión es *FAR1*, cuyo producto inhibe la actividad de complejos Cln/Cdc28. Además, como consecuencia de la transmisión de dicha señal, se impide la transcripción de las ciclinas. A resultas de ambos procesos se produce un bloqueo en la fase G1. El polipéptido Far1 lo fosforila Fus3, una de las quinasas que transmiten la señal, para que pueda ejercer su actividad inhibidora. También lo fosforilan los complejos Cln/Cdc28, a los que inhibe. Tal fosforilación parece necesaria para la degradación del factor Far1; además, constituiría, junto al reinicio de la transcripción de las ciclinas, uno de los mecanismos de la adaptación a las feromonas. De todo lo cual se infiere que el complejo formado por ciclina y quinasa Cdc28 estaría capacitado para anular su propio inhibidor y así autoregular su actividad.

Estos procesos regulan la transición de la fase G1 a la fase S mediante el control de los complejos Cln/Cdc28, que, a su vez, forman parte de los mecanismos reguladores. Algunos de ellos se han encontrado en mamíferos, donde su importancia se ha puesto de manifiesto al asociarse la aparición de procesos tumorales con la sobreexpresión de las ciclinas de G1 o con una alteración en la regulación de los inhibidores de los complejos ciclina/quinasa. También hay indicios de que estas ciclinas son fundamentales para la correcta regulación de proteínas supresoras de tumores.

MARÍA HENAR VALDIVIESO
Ins. de Microbiología Bioquímica
CSIC/Universidad de Salamanca

Semillas

De altura

Una mirada somera a nuestro entorno nos enseña que existen plantas silvestres, pertenecientes a la misma o diferentes especies, distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal. El ascenso altitudinal de un nicho ecológico implica, entre otros cambios, un descenso en la temperatura media diaria y un aumento en la intensidad luminosa que incide sobre las partes aéreas de las plantas.

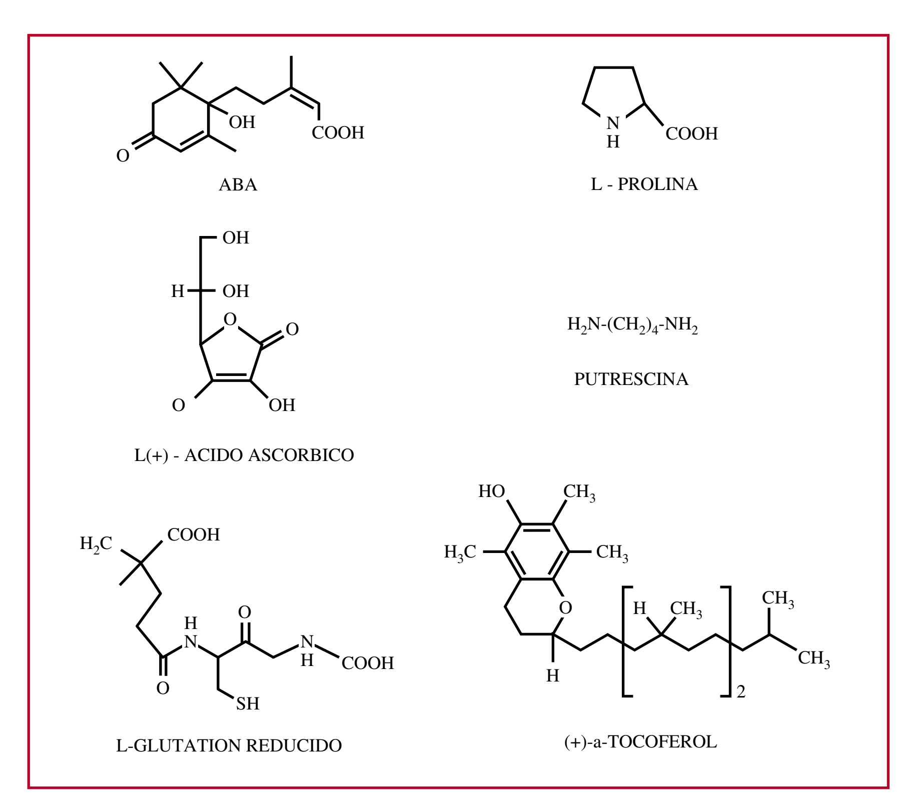
En los ecosistemas de zonas bastante elevadas, las plantas deben adaptar su aparato fotosintético a una mayor irradiación solar. La luz suele ser un parámetro ambiental más importante que la temperatura, a la hora de cuantificar el rendimiento fotosintético foliar. Si se carece de la oportuna adaptación fotónica, podría generarse en los cloroplastos un estado de oxidación tal, que provocaría en términos fotosintéticos su destrucción total o parcial. Entre las modificaciones relacionadas con la adaptación fotosintética a la altitud hemos de citar, además de la adquisición de estructuras protectoras, un aumento del transporte fotosintético de electrones y la síntesis de antioxidantes, como el ácido ascórbico, tocoferol o el glutatión.

La altitud altera también la composición nutricional del suelo y sus relaciones hídricas. El conjunto de todas estas modificaciones provoca cambios hormonales en raíces y hojas —en la concentración de ácido abscísico—, así como alteraciones en ciertos solutos osmóticos —contenido en prolina— y componentes nitrogenados —contenido en poliaminas—, entre otros muchos. Las variaciones en la ruta bioquímica de todos estos metabolitos, cuya principal función es la adaptativa, no sólo interesan a la parte vegetativa de la planta madre, sino también a los órganos diseminantes. Es decir, las semillas de gimnospermas y angiospermas.

Se desconoce el mecanismo mediante el cual tiene lugar la adaptación altitudinal de una especie. Apenas hay datos contrastables. Sólo podemos dar fe de que la respuesta que desencadena una planta para consolidarse en un nicho ecológico determinado e incluido dentro de un gradiente altitudinal es altamente complejo.

La presencia de plantas en altitudes elevadas depende de la adaptación metabólica y de la adaptación estructural. De la comparación de ambas especializaciones con las que caracterizan a las plantas que están establecidas en altitudes más bajas, podremos inferir el mecanismo de supervivencia o adaptación de ciertas especies endémicas.

En la semilla se reflejan todos los procesos adaptativos de la planta que la produce. La propia aparición de la semilla en el ciclo de vida de las plantas constituyó un proceso de adaptación único. Con la semilla se asegura la perpetuación de la especie, incluso en condiciones ambientales adversas. Se acepta que el 97 % aproximadamente de las plantas que viven hoy son espermatofitas. La semilla se forma mediante un complicado proceso de embriogénesis. Terminado el cual, madura, se deseca y se desprende de la planta progenitora, para iniciar un nuevo ciclo vital.



Compuestos conocidos por su implicación en la respuesta al estrés en plantas superiores

La semilla madura contiene sustancias de reserva —hidratos de carbono, lípidos, proteínas, elementos minerales, etc.— en un porcentaje que varía de una especie a otra. Estas sustancias se acumulan en el endospermo y los cotiledones. Arriban a estos tejidos de reserva transportadas desde las hojas, los órganos encargados de la fotosíntesis, a través de los haces conductores del floema, o bien desde la solución del suelo vía los haces conductores del xilema. Esta es la razón por la cual la semilla constituye un sumidero importante de fotoasimilados y otros compuestos durante la última fase del ciclo vital de la planta madre.

Ahora bien, los haces conductores sólo pueden aproximar los fotoasimilados hasta la cubierta de la semilla, pues no existe conexión vascular directa entre la parte vegetativa de la planta madre y los tejidos de reserva de la semilla. La cubierta seminal, por tanto, desempeñará un papel fundamental en el proceso embriológico de la propia semilla y en el asentamiento de una especie en su nicho ecológico.

Adenocarpus decorticans y *Astragalus granatensis* son plantas orófilas, montanas, distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal de Sierra Nevada (España) y cuyas semillas poseen características histológicas en la cubierta seminal que varían con la altitud de su nicho ecológico; difieren éstas, además, en la rugosidad de la cara externa, lo que puede tener que ver con la capacidad de toma de agua por parte de la propia semilla.

Sin embargo, las semillas de *Festuca indigesta* recogidas en Sierra Nevada a 2250 y 2560 metros de altitud no poseen, con respecto a otras cosechadas más abajo, modificaciones particulares en la cubierta seminal. Por decir toda la verdad: las semillas pertenecientes a las plantas del nicho ecológico más alto presentan dos capas de aleurona en torno al endospermo, mientras que las semillas de plantas de hábitats más bajos sólo desarrollan una; quizás haya que atribuir esa divergencia a la velocidad en la degradación del endospermo durante la germinación.

Bajo condiciones ambientales desfavorables, las semillas entran en dormición secundaria, es decir, demoran la fase de germinación, hasta que la temperatura, la luz, la humedad y otros parámetros externos que indujeron ese retraso temporal recobren sus niveles óptimos estacionales. Gracias a ello, un número elevado de especies vegetales quedan protegidas frente a una probable extinción local.

El estrés provocado por la altitud afecta a los tejidos y estructuras celulares de la planta, lo que acarrea alteraciones en el rendimiento de la asimilación. En respuesta al estrés, la planta modifica sus niveles hormonales; lógicamente, las fitohormonas implicadas en el estrés son las más alteradas. Se advierte así un incremento notable de ácido abscísico (ABA), hormona sensora de las variaciones ambientales. Pero no podemos afirmar todavía con absoluta certeza que el ABA sea la molécula responsable de la adaptación a la altitud. Cierto es que las semillas del endemismo *Cytisus reverchonii* elevan sus niveles endógenos de ABA con la altitud; también se observa, sin embargo, el fenómeno opuesto: las semillas del endemismo *Adenocarpus decorticans* disminuyen con la altura su concentración de este parámetro hormonal. Por si fuera poco, en otro endemismo bético, *Astragalus granatensis*, el nivel de ABA no se modifica a lo largo del gradiente altitudinal. A la hora de explicar esa triple situación, no podemos descartar los procesos de estratificación en el medio natural, con la consiguiente desaparición gradual del ABA, o la diferente sensibilidad de las células diana al ABA.

Además de una adaptación fitohormonal, el estrés altitudinal también puede inducir la aparición de sustancias relacionadas con el equilibrio osmótico, a fin de preservar los sistemas membranosos de las células de las semillas. A este respecto, se ha sugerido que la prolina podría constituir un buen indicador altitudinal. Las semillas de los endemismos *Adenocarpus decorticans*, *Cytisus reverchonii* y *Astragalus granatensis* poseen unos niveles endógenos de prolina cuyas variaciones altitudinales se corresponden, además, con las del ABA.

De todos los parámetros fisiológicos implicados en la adaptación altitudinal, solamente el ABA parece guardar correlación con el carácter orófilo de los nichos ecológicos donde se ha desarrollado la planta madre. Sin embargo, la "decisión" que regula la densidad de población y el grado de perpetuación de una especie quizá resida en la respuesta integrada dentro del sumatorio de varios parámetros, entre ellos las señales hormonales, el ajuste osmótico y las condiciones medioambientales.

Probablemente esté ya sentenciada la desaparición de una serie de especies vegetales ante las escasas posibilidades de perpetuarse a largo plazo. Se desconoce la señal molecular de esta "decisión". Pero vale la pena seguir buscándola: hay muchos organismos en juego.

ANGEL MATILLA
Depto. Fisiología Vegetal
Universidad de Granada

De cerca

Maurice Mattauer

Huellas en el barro...



Vemos en la fotografía de la derecha la huella efímera de la caída de una piedra, acompañada de pequeños impactos de gotas de lluvia (*en la parte inferior derecha*). En la arcilla blanda, el movimiento se ha cazado al vuelo, plasmado, aunque está condenado a una destrucción rápida (la fotografía fue tomada en el Pamir chino, al día siguiente de una fuerte tormenta; el chaparrón subsecuente destruyó esta "flor de piedra").

En circunstancias excepcionales, este acontecimiento, que apenas ha durado un instante, podría quedar "fosilizado" y guardado en la memoria durante... millones de años. Hubiera bastado que una lluvia de cenizas volcánicas recubriese delicadamente la arcilla húmeda, y que la capa volcánica, a su vez, hubiera quedado recubierta por un apilamiento de estratos.

Estos rastros hubieran podido salir nuevamente al aire algunos millones de años más tarde, si la erosión hubiera acabado por escindir el conjunto y desprender la capa protectora de cenizas.

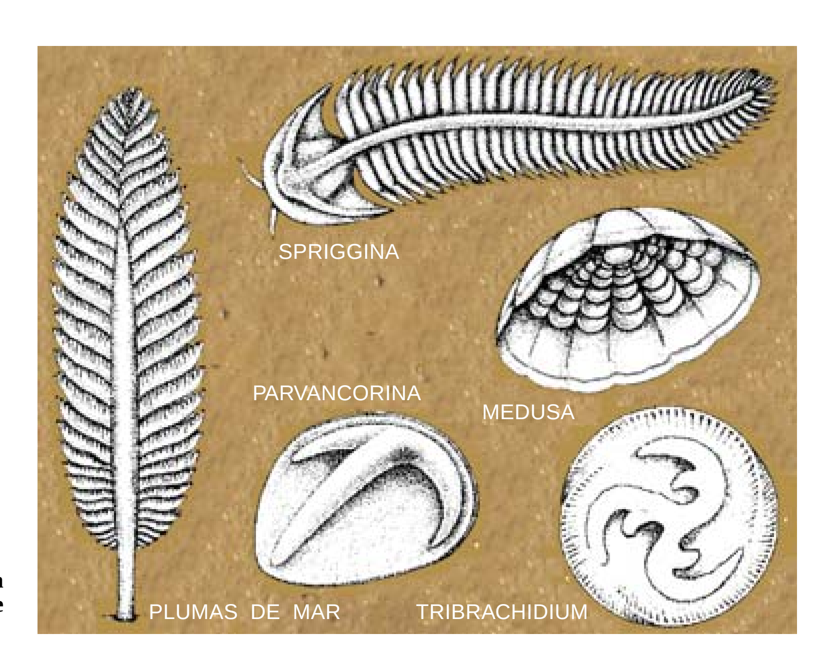
Merced a fenómenos de este tipo se descubrieron huellas de pasos humanos (*izquierda*) en el yacimiento tanzano de Laetoli, en capas de 3,8 millones de años de antigüedad.

Pero las huellas más extraordinarias son, probablemente, las descubiertas primero en Ediacara, en Australia, y después en otros continentes, en estratos de unos 600 millones de años. Estos rastros han proporcionado informaciones minuciosas acerca de los más antiguos seres macroscópicos del planeta. Estos fueron al principio tenidos por antepasados de los grupos actuales, aunque quizá corresponden a extraños ecosistemas microbianos, en forma de fajos y de hojas, cuya organización no es ni animal, ni vegetal... y desaparecidos bruscamente.

Esta interpretación, importante en la evolución de la vida, ha sido propuesta por Adolf Seilacher, especialista en huellas que en 1993 recibió el premio Crafoord de la Real Academia de Ciencias de Suecia.

Pero no nos olvidemos de la física. Nuestra "flor de piedra" pone de manifiesto algunos principios mecánicos. Probablemente podríamos calcular la velocidad con que la piedra penetró en el barro, y reconstruir la evolución a lo largo del tiempo del surtidor de arcilla. Me contentaré con aclarar que fui yo quien la arrojó, por pura curiosidad... y quedé sorprendido al comprobar que la rugosidad de la piedra quedaba magníficamente expresada por los exquisitos trazos curvilíneos.

1. Huella de una caída de piedra en suelo de arcilla.

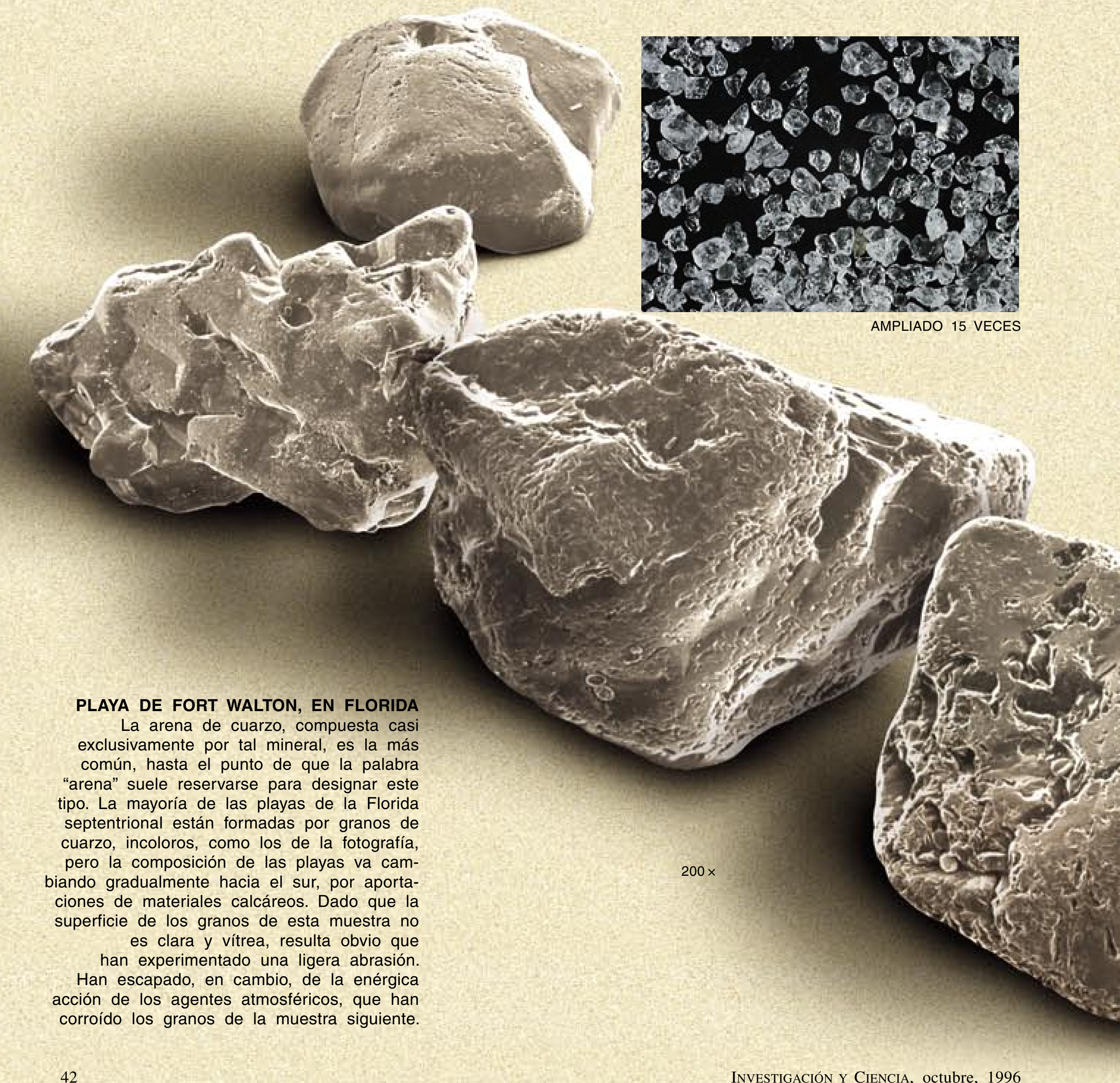


2. Reconstrucción de fósiles descubiertos en Ediacara. *Parvancorina* y *Tribrachidium* no se asemejan a ningún animal conocido.

Arenas del mundo

La arena, uno de los elementos más corrientes de la superficie terrestre, es también uno de los que ofrecen mayor diversidad

Walter N. Mack y Elizabeth A. Leistikow



AMPLIADO 15 VECES

PLAYA DE FORT WALTON, EN FLORIDA
La arena de cuarzo, compuesta casi exclusivamente por tal mineral, es la más común, hasta el punto de que la palabra "arena" suele reservarse para designar este tipo. La mayoría de las playas de la Florida septentrional están formadas por granos de cuarzo, incoloros, como los de la fotografía, pero la composición de las playas va cambiando gradualmente hacia el sur, por aportaciones de materiales calcáreos. Dado que la superficie de los granos de esta muestra no es clara y vítrea, resulta obvio que han experimentado una ligera abrasión. Han escapado, en cambio, de la enérgica acción de los agentes atmosféricos, que han corroído los granos de la muestra siguiente.

> EN UN GRANO DE ARENA VER UN MUNDO
> Y EN UNA FLOR SILVESTRE, EL CIELO.
> ANCLAR LA ETERNIDAD EN UN SEGUNDO;
> SUJETAR EL INFINITO ENTRE LOS DEDOS.
>
> —*Auguries of Innocence*, William Blake

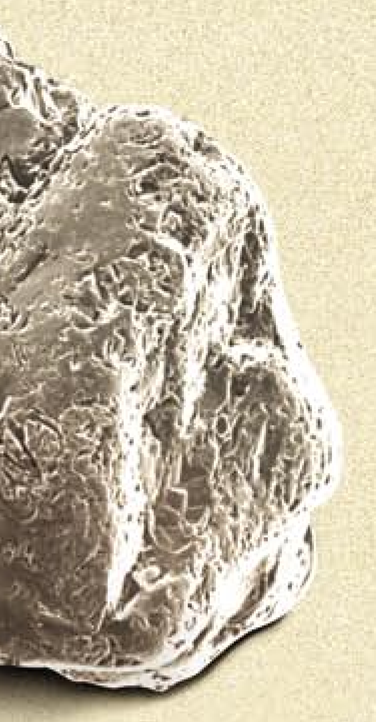
Cuando tomamos en la playa un puñado de arena y la miramos escurrirse entre los dedos tenemos ante nuestra vista el producto de millones de años de historia geológica. Si miramos las partículas al microscopio, se nos revelará su historia, vale decir, los secretos de su origen y su andadura en el tiempo.

Casi todas las arenas inician su vida siendo rocas continentales de regiones montañosas, rocas compuestas sobre todo por cuarzo y feldespato. La fragmentación mecánica (por movimiento de glaciares o por ciclos de congelación y deshielo) produce piedras y cantos rodados. Después, el ataque químico (de la vegetación y la lluvia) se conjuga con la desintegración mecánica para ir royendo estos peñascos y guijarros, dando al cabo nacimiento a granos sueltos. En la definición de los geólogos, las arenas son fragmentos pétreos de diámetro comprendido entre 0,05 y 2 milímetros; las partículas de tamaño mayor se denominan gravas, las de tamaño menor, lodos.

Tras su nacimiento, los granos son arrastrados por las escorrentías hasta el lecho de un curso de agua. Ruedan allí por el fondo, chocando unos contra otros, acumulándose ahora en el remanso de un remolino, luego al abrigo de un peñasco. Tal vez pasen años antes de que den el paso siguiente de su viaje, pero al final acaban abandonando las montañas por vía fluvial. Parte de la arena del río llega hasta la costa; parte se deposita a lo largo del camino. Un río de tamaño medio necesita un millón de años para trasladar sus depósitos arenosos 160 kilómetros aguas abajo. Durante el proceso, los agentes químicos disueltos en el agua pulimentan muchos granos, dejándolos lustrosos y relucientes.

El viento, al igual que el agua, interviene también en el reparto de la arena. Donde la vegetación es rala, el viento pone las partículas en movimiento. Van éstas con su soplo saltando y serpeando, a veces elevadas hasta unos treinta centímetros sobre el suelo. Los granos transportados por el viento no quedan pulidos, sino que adquieren un aspecto opaco, mate y deslustrado.

No todas las playas arenosas tuvieron su origen en fragmentos pétreos arrastrados ladera abajo por las aguas o llevados por el viento. Algunas playas están compuestas por partículas de caliza formada en el mar o en sus proximidades. Y allí donde el agua es cálida y la actividad biológica grande, las playas pueden estar constituidas, en parte o en su totalidad, por restos de invertebrados marinos. Son éstas las playas calcáreas, cuyos granos de “arena” revisten mayor interés en el examen microscópico, pues se cuentan entre las más coloristas y delicadas obras de arte que la naturaleza ofrece.





7 ×

DESIERTO DE SAHARA, ENTRE EL CAIRO Y ALEJANDRIA
Estas arenas exhiben los signos característicos de la erosión eólica: superficies mates y opacas. Las partículas arrastradas por el viento presentan superficies ásperas porque carecieron de la amortiguación y pérdida de peso que proporciona el medio acuoso; el contacto con otras partículas las somete, por tanto, a una abrasión mayor. También la velocidad del viento inflige a los granos un castigo más enérgico. No menos evidente es otra diferencia: las arenas del desierto tienden a mostrar una variedad de tamaños más amplia. El agua cierne sus sedimentos más selectivamente que el aire y decanta más juntamente las partículas de tamaño similar.



23 ×

NORTH BEACH, EN HAMPTON (NEW HAMPSHIRE)
Al retroceder, la sábana de hielo de Norteamérica fue dejando en pos enormes cantidades de detritus a lo largo del abrupto litoral del noroeste de los Estados Unidos. Este espécimen aporta una muestra de aquellos depósitos —una mezcla de cuarzo (*granos incoloros*), feldespato (*rosa y ámbar*) y materiales ígneos opacos (*negro*).





6,5 ×

PUNALUU, EN HAWAI
Las arenas de las famosas playas negras hawayanas son de obsidiana: vidrio volcánico resultante del magma que al fluir llegó hasta el mar, donde la rapidez del enfriamiento provocó su vitrificación. El agua y las olas actuaron sobre los fragmentos desprendidos de la masa vítrea y acabaron por reducirlos a fina arena negra.



30 ×

COSTA MERIDIONAL DEL LAGO SUPERIOR, EN MICHIGAN
Son muchas las playas que muestran desconcertantes venas negras al borde del agua. Tales venas parecen formadas por detritus orgánicos o por arenas empapadas en sustancias bituminosas, pero en realidad están constituidas por partículas de magnetita. Estas partículas magnéticas, duras y más densas que los granos circundantes, quedan depositadas a orillas del agua, mientras que las olas lanzan hacia lo alto de la playa los fragmentos de cuarzo, menos densos. (En esta muestra, los granos rosa pálido son de cuarzo; los de color rojizo tal vez sean de granate.) Los navegantes del siglo XII colocaban la magnetita, o piedra imán, en el hueco de una cañita; dejando flotar cuidadosamente la cánula en un cuenco de agua obtenían un rumbo norte-sur mediante este rudimentario compás magnético.

LAGO NORTHERN LIGHT, EN ONTARIO (CANADA)
No todas las playas negras son de obsidiana ni de arena magnética. La playa del lago Northern Light, por ejemplo, está formada por un depósito de finos cristales de hornblenda (un silicato complejo). Lago y playa de hornblenda que dejó en su retirada la sábana de hielo norteamericana.



Muestras de arena sin ampliación



PLAYA DE FORT WALTON,
Florida



DESIERTO DE SAHARA,
entre El Cairo y Alejandría



NORTH BEACH,
en Hampton, New Hampshire



PUNALUU,
Hawai

CAYO HAWKSBILL, EN EXUMA (BAHAMAS)
Algunas de las playas blancas más fotogénicas y resplandecientes se encuentran a lo largo del golfo de México y en el archipiélago de las Bahamas. Su arena está formada por partículas lisas de una caliza, dura como la porcelana, llamada oolita, nombre de procedencia griega que significa "piedra ovoide". No se conoce el proceso exacto de la formación de estos diminutos "óvulos". Un elemento esencial es la presencia de aguas someras sobresaturadas de carbonato de calcio y magnesio; otro, la presencia de ondulaciones en el lecho marino, que permiten que la acción de las olas hagan girar las partículas de arcilla o de arena fina, sobre las cuales se depositan después capas concéntricas de carbonatos.

INSERTO: Un grano de oolita fracturado, visto al microscopio electrónico de barrido, revela la estructura laminar en torno al núcleo de la partícula (el cual no es visible) mostrando capa tras capa de carbonato de calcio y magnesio.

87 ×

23 ×





18 ×

PLAYA DE SILVER SANDS, EN LA GRAN BAHAMA
La "arena" que vemos aquí está formada, casi exclusivamente, por gravillas coralinas procedentes de los arrecifes próximos. Se observan, además, dos espículas fusiformes, una sección transversal del tubo de un gusano marino, la concha de un gasterópodo y dos foraminíferos redondos y grandes, de color rojo.

CAYO INDIO, EN FLORIDA
Todo el coral y todas las conchas de esta muestra han perdido el lustre, quedando su exterior con un aspecto mate, calcáreo y granulado. Esta característica que se observa en las playas blancas de los cayos tropicales de Florida nos habla de la descomposición del material calcáreo de la playa. Las aguas, cálidas, la luz solar directa y el agua dulce, abundante a causa de las lluvias, pueden coadyuvar para devolver al mar los carbonatos de los esqueletos de las plantas y animales muertos. Vemos aquí las conchas de cuatro gasterópodos fusiformes y la de uno globular, así como los restos de al menos dos conchas de bivalvos, en proceso, todas ellas, de ser reclamadas por el océano.



23 ×



5 ×



COSTA MERIDIONAL DEL LAGO SUPERIOR,
Michigan



LAGO NORTHERN LIGHT,
en Ontario, Canadá



CAYO HAWKSBILL,
en Exuma, Bahamas



PLAYA DE SILVER SANDS,
en la Gran Bahama



6,5 ×



21,5 ×

ISLA LIFUKA, DEL GRUPO HAAPAI, EN TONGA (PACIFICO SUROCCIDENTAL)
Los restos de foraminíferos integran las arenas de ciertas islas del Pacífico meridional. Estos seres unicelulares producen una concha compleja o teca, provista de numerosos compartimentos, muy finos, algunos de los cuales se aprecian en la fotografía. La especie que predomina en la muestra corresponde a un macroforaminífero común en las aguas someras de los mares tropicales.





CAYO INDIO,
Florida



ISLA LIFUKA, DEL GRUPO HAAPAI.
Tonga, en el Pacífico Suroccidental



PLAYA DE LAS SIETE MILLAS,
en Dongara, Australia



TAKETOMI SHIMA,
Islas Ryukyu, Japón



17×

SAINT-TROPEZ, EN LA RIVIERA FRANCESA

El arrecife situado frente a Saint-Tropez da sostén a una multitud de animales, cuyas conchas arribaron a la playa arrojadas por las olas. En esta muestra, las conchas cónicas de gasterópodos lucen la complejidad de su belleza. Una exhibe los orificios que ha perforado en ella un depredador hambriento; vemos en otras detritus firmemente alojados en su abertura. La concha alargada y tubular perteneció a un molusco del género *Caecum*. Esta criatura comienza su vida siendo una miniatura de caracol normal, de concha espiralada, pero después crece sólo en una dirección. Bajo él se encuentra el cuerno blanco y levemente desgastado de un carnero marino (*Skeneopsis planorbis*). Cerca del centro vemos un cristal grande de mica negra con vetas doradas; la barrita rojo-pardusca es una espícula de esponja o una espina de un erizo de mar.

PLAYA DE LAS SIETE MILLAS, EN DONGARA (AUSTRALIA)

Justamente frente a la playa de las Siete Millas, en el canal de Geelvink, se encuentra una plataforma continental somera, rebosante de vida llegada del océano Indico. En esta fotografía se evidencian muchas conchas y corales; sin embargo, los objetos que más llaman la atención son las espículas espongiarias triaxiales, parecidas a carámbanos, y los caparazones muy inmaduros de gasterópodos globulares y discoidales, así como las conchas de moluscos bivalvos.

6×



SEAFORD, EN INGLATERRA

La ciudad de Seaford se encuentra en el sur de Inglaterra, en el canal de la Mancha, donde las corrientes de marea son muy fuertes y, frías, las aguas. No obstante, una muestra de la arena de la playa revela una sorprendente variedad de vida animal, amén de algunas otras características notables. Los objetos planos azules y pardos son fragmentos de bivalvos; la concha blanca de un gasterópodo (*abajo, a la izquierda*) exhibe el crecimiento de dos verticilos corporales. Las tres agregaciones de granos de arena se encuentran todas pulcramente cementadas (*izquierda, centro y derecha*). Los granos de cuarzo ofrecen un aspecto esmerilado; sin embargo, uno de los granos (*lado derecho*) es anguloso y presenta una superficie sin rayas, como si se hubiera incorporado recientemente a los fragmentos más atacados.

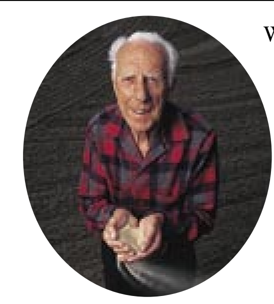


15×

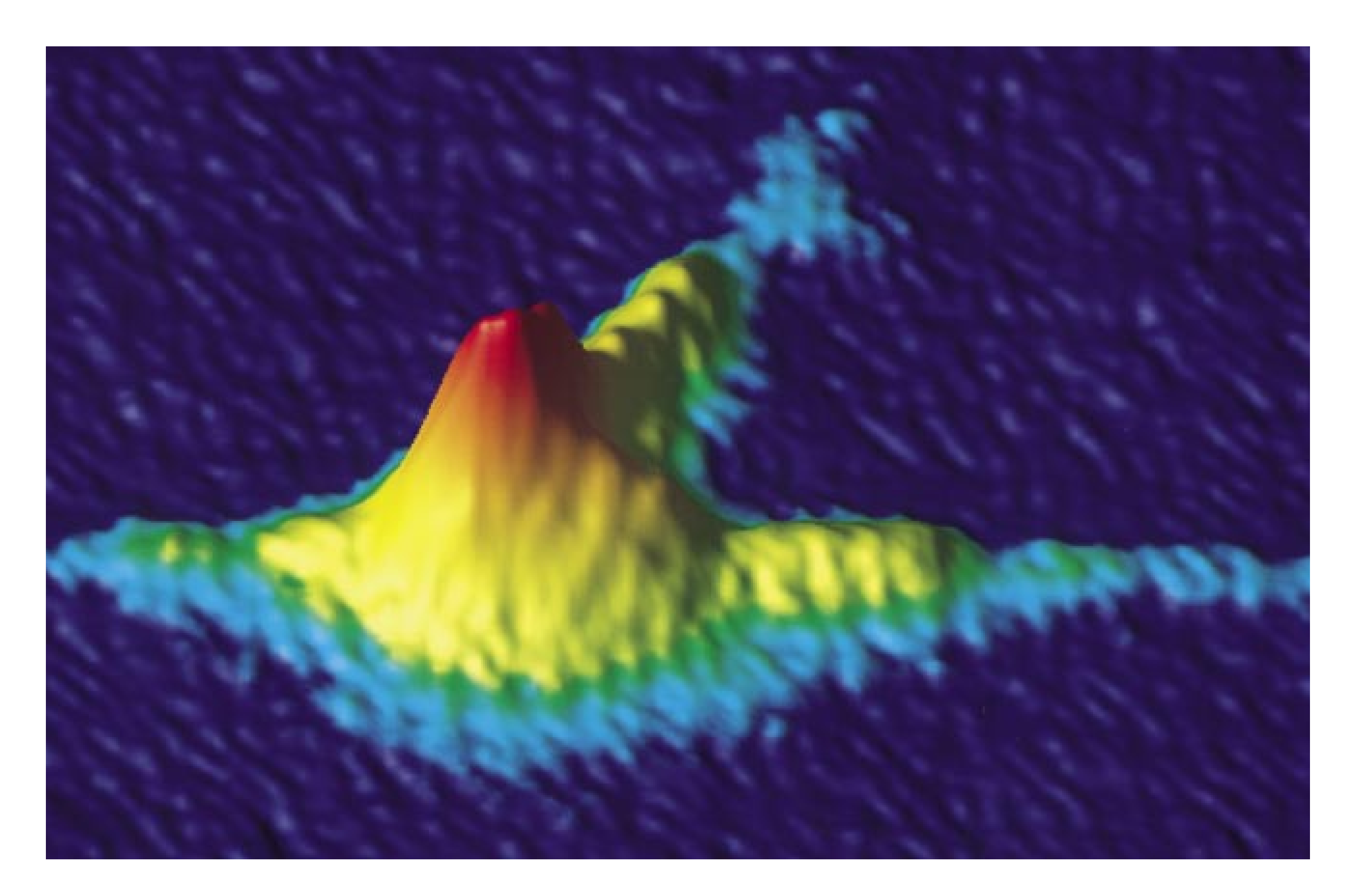
TAKETOMI SHIMA, EN LAS ISLAS RYUKYU (JAPON)

Algunas de las islas meridionales del archipiélago japonés son renombradas por sus hermosas arenas asteriformes. Los granos de arena en forma de estrella proceden de tecas de foraminíferos. En ese rasgo morfológico se fundan los taxónomos para clasificarlos. Esta muestra contiene fundamentalmente *Baculogypsina sphaerulata*. Véase también una teca de un foraminífero redondo, de *Amphistegina madagascariensis* (*arriba, a la derecha*), y una única concha nacarada de gasterópodo (*a la izquierda del centro*).

REDUCIDO 32 VECES



WALTER N. MACK y ELIZABETH A. LEISTIKOW se han interesado por la arena desde hace mucho. Mack (*izquierda*), que se doctoró en microbiología por la Universidad de California en San Francisco en 1947, enseñó durante más de 30 años en la de Michigan. Su confesada fascinación por la arena comenzó desde muy joven, en unas vacaciones en el lago Michigan. Desde entonces, ayudado por amigos y conocidos, ha recogido arena de todos los rincones del mundo, la ha examinado al microscopio, la ha fotografiado y la ha estudiado. Leistikow, que fue alumna de Mack, se doctoró por la Universidad estatal de Wayne. Trabaja con FSH/Mayo Health Systems, en La Crosse, Wisconsin.



Superconductividad a altas temperaturas

La luz aportada por recientes experimentos de ciertos efectos cuánticos muy sutiles nos acerca al conocimiento del mecanismo en cuya virtud algunas cerámicas conducen la electricidad sin oponer resistencia

John R. Kirtley y Chang C. Tsuei

Pocas sesiones habrá habido más memorables en la historia de la física que la celebrada el 18 de marzo de 1987 durante una reunión de la Sociedad Norteamericana de Física. Se organizó de prisa y corriendo para dar cabida a las muchísimas comunicaciones que habían llegado fuera de plazo. Dos mil físicos acudieron al hotel Hilton de Nueva York. Apiñados en un salón de baile, desbordado hasta el vestíbulo, se las veían y deseaban para ofrecer y escuchar los cinco minutos de disertación sobre las últimas ideas e investigaciones.

La causa de tanta conmoción académica fue el anuncio de la superconductividad a altas temperaturas. A finales de 1986 J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller, del Laboratorio de Investigaciones de IBM en Zurich, comunicaron que una cerámica, el óxido de lantano, bario y cobre, perdía toda resistencia eléctrica enfriada sólo a –238 grados centígrados, o 35 kelvins (grados sobre el cero absoluto). Aunque es una temperatura muy baja, estaba diez grados por encima de la mejor a la que se hubiese conseguido hasta entonces la superconductividad, siempre con metales o aleaciones. Enseguida se anunciaron y confirmaron temperaturas críticas de más de 90 kelvins, y abundaron los rumores de superconductividades a 130 y 240 kelvins. Si algún día se hallase un material que supercondujese a la temperatura ambiente (unos 300 kelvins), la sociedad entraría en una nueva era.

En la reunión de marzo se presentaron artículos sobre la teoría y la medición de los nuevos superconductores. El frenesí de la sesión no se debió sólo al sueño de la superconductividad a temperatura ambiente sino también, en parte, al miedo. A algunos les

preocupaba que se conociesen bien estos materiales de óxido de cobre, a menudo llamados cupratos, antes de haber elaborado ellos la teoría correcta que les valiera el Nobel.

Nueve años después, tal nerviosismo se nos antoja injustificado. Miles de científicos de todo el mundo han dedicado millones de horas a la búsqueda, hasta hoy infructuosa, de por qué y cómo superconducen los cupratos a temperaturas tan altas. Pese a todo, se ha progresado bastante. Experimentos recientes han mostrado que los cupratos difieren de los superconductores al uso y, además, han delimitado las lindes entre teorías competidoras. De sus resultados se desprende un mecanismo radical: las fluctuaciones magnéticas de los átomos que constituyen el medio.

Que el secreto se esconda en el magnetismo contrasta de plano con las ideas, bien asentadas, acerca de la superconducción a bajas temperaturas. A tenor de la descripción más extendida, la superconductividad se produce cuando los electrones se combinan y forman pares de Cooper (en honor de Leon N. Cooper, padre del concepto). A diferencia de lo que ocurre con los electrones sueltos, los pares de Cooper no chocan entre sí, ni se dispersan por las imperfecciones del medio conductor; no hay, por tanto, resistencia que se oponga a su avance. La corriente eléctrica fluye en los superconductores sin voltaje; si lo hace por un camino cerrado, seguirá haciéndolo para siempre mientras la sustancia permanezca enfriada por debajo de su temperatura crítica.

Resulta llamativo que los electrones de los metales puedan emparejarse: todos tienen carga negativa y, por ende, tienden a repelerse. En los años cincuenta, Cooper, John Bardeen y J. Robert Schrieffer encontraron una explicación. La teoría BCS, denominada así por las iniciales de sus creadores, afirma que los electrones de los superconductores clásicos superan de dos formas su repulsión mutua. En la primera se bloquea parte de la carga negativa. Este efecto de "apantallamiento", causado por los movimientos de los otros electrones, reduce la fuerza de repulsión entre los del par de Cooper.

En la segunda, la más importante, es un mediador el que junta a los electrones que mutuamente se repelen. Esta función casamentera la desempeñan los iones positivos que forman el metal. (Los átomos neutros se vuelven iones positivos al donar electrones para la conducción.) Un electrón que se mueva desplazará un poco las posiciones de los iones a su paso por la vecindad de los mismos. Estas distorsiones, o fonones, crean pequeñas zonas positivas que atraen a otros electrones. Se compara ese comportamiento con el de las bolas de una bolera sobre una cama elástica. Una distorsiona los muelles del colchón y la distorsión atrae a otra.

Pero la analogía se acaba ahí, pues los electrones se repelen mutuamente con fuerza. Bardeen encontró una metáfora más ajustada: el barullo de los jugadores en una cancha de fútbol americano. Los pares de Cooper son las parejas que, en la *melé*, intentan desesperadamente seguir juntas. Una vez iniciado el apelotonamiento, se hace muy difícil detenerlo, porque, para parar a un sujeto, hay que parar a muchos. Los apelotonados se desplazarán alrededor de los obstáculos, los postes por ejemplo, sin apenas modificaciones.

Al decir de los físicos, los electrones se mantienen emparejados porque intercambian fonones, lo mismo que los jugadores de rugby se emparejan pasándose la pelota para que no los derriben mientras corren campo adelante. Incorporado en la teoría BCS, el mecanismo fonónico de emparejamiento explica cabalmente la superconductividad de los materiales comunes.

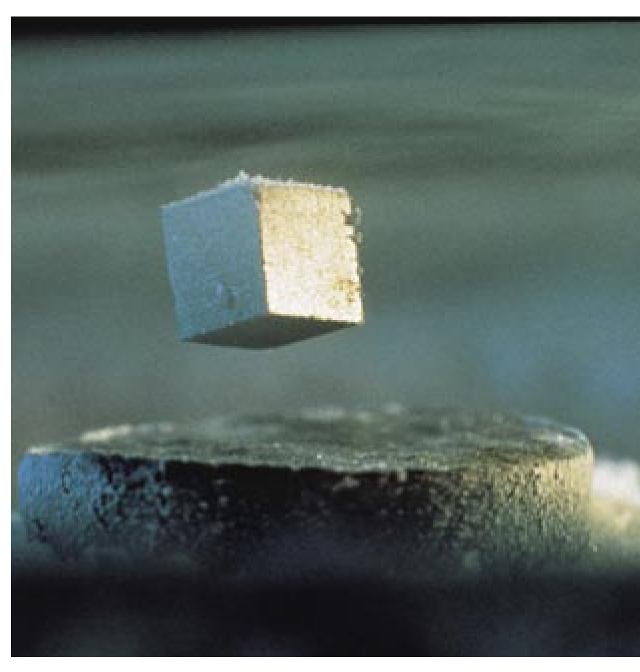
Pero el modelo BCS no puede explicar por sí solo la superconductividad de los óxidos de cobre. Los electrones y los fonones de unos superconductores BCS que tuviesen una temperatura crítica alta interaccionarían entre sí con violencia. En ese caso, la estructura de los materiales acabaría por distorsionarse de tal forma que dejarían de ser superconductores y, en muchísimas ocasiones, incluso conductores.

JOHN R. KIRTLEY y CHANG C. TSUEI buscan cuantos de semiflujo en anillos superconductores en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, instalado en Yorktown Heights. Ambos son, además, miembros de la norteamericana Sociedad de Física.

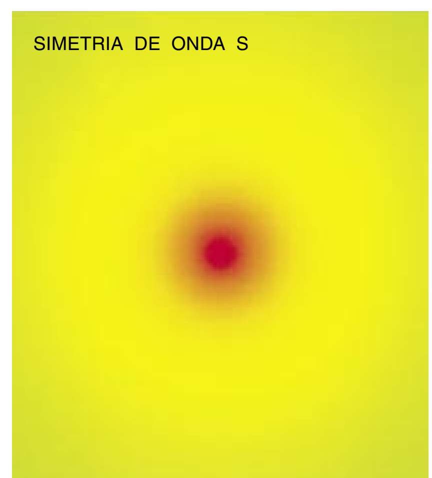
Además, el modelo BCS se basa en que los electrones llevan más energía que los fonones. Se mueven más deprisa que éstos; cuando llega el segundo electrón, el primero se ha alejado ya del ion desplazado. Esa distancia entre los electrones reduce los efectos de la mutua repulsión negativa. Pero en los cupratos los electrones y los fonones se moverían a velocidades parecidas y no habría una distancia grande entre los electrones de los pares.

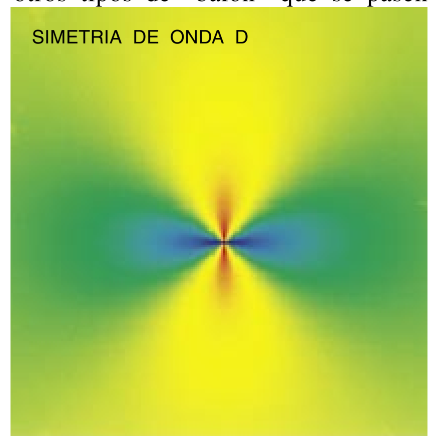
Mencionamos a los electrones como vehículos de la electricidad, pero la verdad es que, en la mayoría de los cupratos, los portadores de corriente eléctrica son los "huecos", los espacios dotados de carga positiva que dejan los electrones. Tales huecos se generan cuando se añaden átomos adicionales, los dopantes, a la sustancia para que absorban algunos electrones. (En lo que queda de artículo usaremos la palabra "vehículos" en vez de "electrones" cuando nos refiramos a los componentes de los pares de Cooper.)

Ante la dificultad de explicar las temperaturas críticas grandes por medio de los fonones, se han propuesto otros mediadores del emparejamiento,



1. EL FLUJO MAGNETICO penetra a través de la intersección de tres fronteras creadas en una película superconductora en la que no está inscrito ningún patrón (*página anterior*). Este "cuanto de semiflujo" da a entender que podría esconderse una física radical tras la superconductividad de altas temperaturas, fenómeno que, algún día, podría conocer usos prácticos, la levitación de trenes por ejemplo. Aquí, un imán flota sobre un superconductor basado en itrio (*derecha*).





2. LOS DOS TIPOS DE SIMETRIA de la función de ondas superconductora son la de onda s y la de onda d. En la onda s, cada miembro del par de Cooper se encuentra en un área esférica alrededor de su compañero. En la simetría de onda d, el compañero está en alguna parte de uno de cuatro lóbulos, que son negativos (*azul*) o positivos (*amarillo y rojo*).

otros tipos de "balón" que se pasen entre los "jugadores de rugby". Por ejemplo, los excitones; en ellos los vehículos de la carga causan movimientos locales de la nube de carga eléctrica que los rodea. También, los plasmones, donde los vehículos excitan movimientos colectivos de la nube de carga circundante; o incluso los polarones, en los que los vehículos producen grandes desplazamientos de iones y de otros vehículos de carga entre los que se mueven. Cada carga consta de dos partículas distintas, capaces de saltar entre las capas del material.

Los cupratos son complicados. Tienen varias capas que aíslan la de óxido de cobre, que es la principal zona conductora. No se han ideado pruebas que permitan determinar los mecanismos de emparejamiento, o al menos no hay conformidad con ninguna. Pero sí se ha progresado en una característica poderosa del estado superconductor: su simetría. Esta peculiaridad podría devenir la prueba del tornasol de los mecanismos de emparejamiento propuestos.

La simetría guarda relación con la forma que tenga la descripción matemática del estado superconductor, o función de onda. Dicha función define la manera en que se mueven entre sí los dos vehículos que forman el par de Cooper; e indica la probabilidad de hallar a uno de los compañeros en función de su posición relativa a la del otro.

Los pares de Cooper de los superconductores clásicos adoptan la función de ondas más simétrica posible: la simetría esférica, o de onda s. Es decir, la posibilidad de encontrar en un lugar a un vehículo de un par de Cooper, dada la posición del otro, cae al mismo ritmo exponencial en todas las direcciones del espacio. Si representamos gráficamente la función de onda dejando en el centro a un miembro del par de Cooper, la probabilidad de encontrar a su compañero tendrá la forma de una esfera.

El siguiente estado más simétrico que podrían tener los cupratos es el d. Representado, salen cuatro lóbulos dispuestos en un plano, como un trébol de cuatro hojas. Cada uno representa una posición probable de un miembro del par de Cooper con respecto a la de su compañero. La simetría d implica, además, que los miembros del par no estén tan cerca el uno del otro que la repulsión mutua interfiera su acoplamiento.

¿Cómo contribuiría la identificación de la simetría del estado superconductor a determinar los mecanismos que crean los pares de Cooper? Algunos de los mecanismos propuestos producen una simetría precisa. Hasta hace unos años casi todos los teóricos estaban en uno de dos campos. Un grupo era partidario de los mecanismos que generaban estados de onda s; la mayoría de estas teorías, aunque no todas, tendían a ser modificaciones de la teoría BCS basada en la mediación de los fonones. Otros teóricos creían en mecanismos que generaban estados de onda d. Sus propuestas eran más bien reelaboraciones bastante radicales de la física subyacente.

De las teorías con simetría de onda d, la dominante quizá sea el modelo de ondas de espín, tesis abanderada por Douglas J. Scalapino, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y David Pines, de la Universidad de Illinois. En esta teoría, una carga móvil puede romper la orientación de los espines de los átomos que constituyen el medio superconductor. En efecto: el vehículo deja en su estela una perturbación magnética (una onda de espín), la estela arrastra a un segundo vehículo y así se forma un par de Cooper. Las ondas de espín duran poco; por eso suele llamárselas fluctuaciones de espín.

Muchos pensaban que la simetría del estado superconductor podría indicar cuál era la teoría correcta. Pero las cosas resultaron más complicadas. Se ha descubierto que una misma simetría puede venir causada por mecanismos diferentes. La identificación de la simetría, pues, no establece por sí misma el mecanismo. Más exacto es decir que el éxito en la identificación permitiría a los teóricos depurar sus modelos. Por ejemplo, si se mostrase inequívocamente que el estado superconductor no tiene la simetría de una onda d, las ondas de espín quedarían descartadas como mecanismo de emparejamiento.

La simetría de onda d goza de una propiedad que puede comprobarse: la mayor debilidad del enlace de los pares de Cooper en algunas direcciones, relativas a la red atómica subyacente. Por sí sola, podría dejar vehículos desemparejados que se desplazasen a lo largo de ciertas direcciones. Se los ha buscado en varias ocasiones. Para ello se han observado la facilidad con que penetraban los campos magnéticos en el superconductor o la cantidad de calor necesaria para calentar el material. Los resultados de estos experimentos apoyan en general la presencia de vehículos sin pareja a bajas temperaturas, pero no convencen a la mayoría de los expertos. A veces el experimento era un tanto indirecto, y lo obtenido, a menudo compatible con otros estados de simetría (incluso de onda s modificados).

Así que, en vez de buscar vehículos libres, otros se empeñaron en medir la variación de la intensidad del emparejamiento de Cooper con el ángulo. Para ello vieron cómo la luz de alta frecuencia excita los vehículos y los saca de la muestra, cómo cambia la frecuencia de la luz que atraviesa el material y cómo los electrones entran en los cupratos desde otros materiales atravesando, mediante el efecto túnel, finas barreras aislantes.

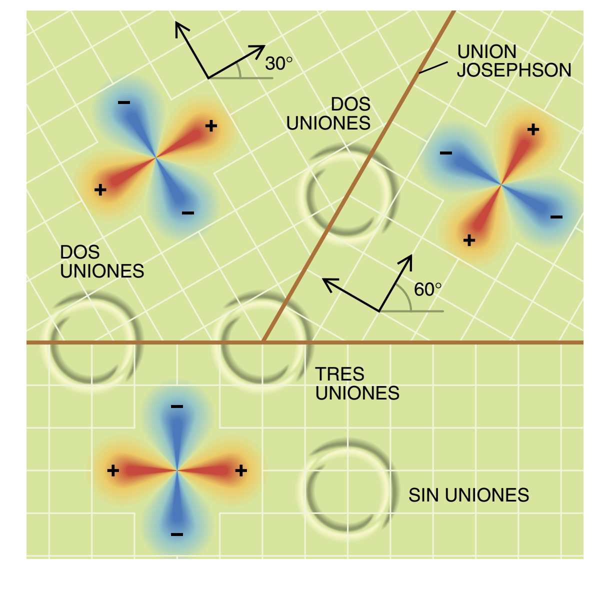
Esos estudios revelaron la existencia de variación angular en la intensidad de emparejamiento. Pero no pudieron dar la prueba irrefutable de la ondas d para otra cuestión. En los estados

de simetría de onda d la función de onda cambia de más a menos y luego otra vez de menos a más; en otras palabras, el signo de los cuatro lóbulos es alterno: dos son positivos y dos negativos. Los experimentos eran insensibles a las diferencias de signo; los datos, pues, no son una victoria concluyente de la simetría de onda d.

Pero hay una manera de ver los signos positivos y negativos de los lóbulos. El método se basa en una propiedad bien conocida: un superconductor anular atrapa el campo magnético en el espacio que encierra, y lo atrapa en haces discretos, o cuantos de flujo. A un cuanto de flujo puede atribuírsele una forma de tubo. Su flujo magnético total (el campo magnético por el área encerrada en el anillo) es igual a una constante fundamental. (En concreto, igual a $h/2e$, donde h es la constante de Planck y e la carga del electrón.) Los anillos de los superconductores clásicos, que tienen funciones de onda con simetría s, encierran múltiplos enteros de esos cuantos de flujo.

Los anillos creados con superconductores cuyo estado de simetría sea d cuantizan el flujo de otra manera. Según los cálculos de la energía del sistema y del flujo magnético atrapan múltiplos semienteros del cuanto de flujo. Por tanto, la presencia o la ausencia de la cuantización semientera puede determinar si los lóbulos cambian de signo y la forma en que lo hacen.

La detección de cuantos de flujo semienteros es reciente, pese a que Lev N. Bulaevskii y otros predijeran su existencia a finales de los años setenta. Los primeros indicios experimentales los obtuvo en 1993 Dieter Wohlleben, de la Universidad de Colonia, con sus estudios de la magnetización. Luego, Dave Wollman y Dale Van Harlingen, de la Universidad de Illinois, aportaron pruebas más concretas midiendo



3. EL EXPERIMENTO DEL ANILLO "TRICRISTALINO" puso a prueba los modelos de onda d (*derecha*). Se orientaron tres secciones de un superconductor basado en itrio de manera que se creasen unas fronteras, o uniones Josephson. Los anillos se grabaron de suerte tal que uno tuviese tres uniones; los otros tenían dos o ninguna. Si el estado superconductor fuese una onda d, debería formarse dentro del anillo con tres uniones un cuanto de semiflujo magnético; los otros, con un número par de uniones, no deberían producir ningún flujo. La imagen del cuanto de semiflujo (*abajo*) prueba que las teorías de onda d son explicaciones viables.

la corriente y el voltaje característicos de unos anillos superconductores hechos de un cristal único de óxido de itrio, bario y cobre (YBCO) y una película delgada de plomo.

Nuestro grupo de IBM hizo las primeras observaciones directas y sacó las primeras imágenes de esos cuantos de semiflujo. Utilizamos unos anillos de cuprato especialmente diseñados. Los interrumpen unas capas delgadas de materiales aislados; estas barreras, o uniones Josephson, son lo bastante finas para que los pares de Cooper puedan atravesarlas mediante el efecto túnel mecanocuántico. La travesía recibe el nombre de efecto Josephson, en honor de Brian Josephson, que predijo el fenómeno en 1962.

El efecto túnel de Josephson sólo ocurre si los pares de Cooper que se encuentran a un lado de la unión están "fuera de fase" con respecto a los del otro. "Fase" se refiere aquí a una de las características principales de la función de onda (hablando laxamente, describe en qué parte de un ciclo está la función de onda). Con los superconductores de onda d se puede diseñar un anillo con uniones Josephson que cambien automáticamente la fase del par de Cooper que circule por el anillo. Ese cambio de fase es equivalente al de signo de la función de ondas.

Al enfriar, entonces, el automático cambio de signo generará espontáneamente la corriente necesaria para encerrar, de manera exacta, la mitad de un cuanto de flujo magnético. Cuando el anillo se enfría dentro de un campo magnético, lo atraviesan flujos con valores de 3/2, 5/2, 7/2, etc., multiplicados por el cuanto de flujo.

Formamos anillos de película delgada del superconductor basado en itrio sobre un sustrato diseñado de suerte tal que uno de los anillos contuviera tres secciones. Cada una estaba desviada 30 grados con respecto a las secciones vecinas, con lo que cada frontera creaba una unión Josephson. Si hay pares de Cooper con un estado de simetría de onda d, entonces los que completen un circuito a lo largo del anillo acabarán con el signo cambiado. (En realidad no sabemos cuántos cambios de signo hay, sólo que, con esa geometría, su número tiene que ser impar.)

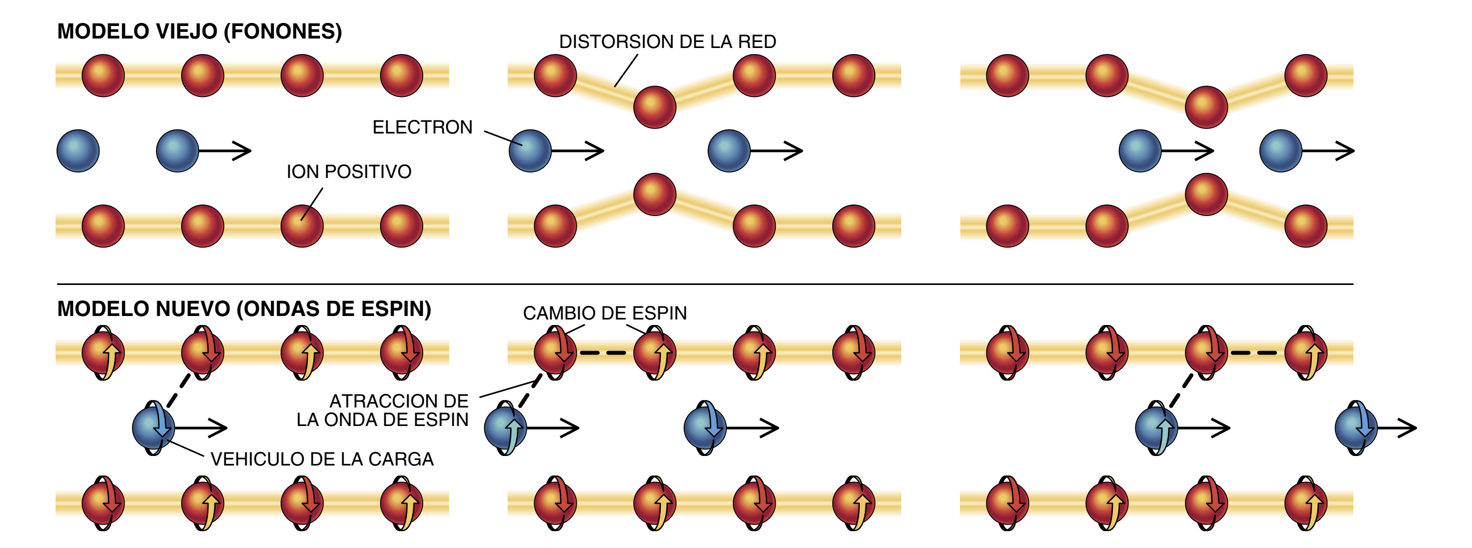
Por el contrario, si el material fuese una onda s, que no cambia nunca de signo, las fronteras no tendrían ningún efecto. Al completarse el circuito no habría cambio de signo.

Fabricamos estos anillos "tricristalinos", cuyo tamaño era de unas 50 micras, y los enfriamos por debajo de su temperatura crítica. Su geometría los hacía inestables por naturaleza en lo que tocaba a la conducción, así que se generó espontáneamente una pequeña supercorriente. En cierto sentido, el anillo actúa como si tuviese un solo pliegue, como una cinta de Möbius. La tendencia del pliegue a deshacerse pone en movimiento a los vehículos de la carga. En nuestro anillo sólo encontramos cuantos de flujo semienteros: la marca segura de la simetría de onda d (la de onda s no habría producido nada).

Construimos imágenes de los campos magnéticos atrapados en los anillos por medio de un dispositivo de interferencia cuántico superconductor de barrido (SQUID). El SQUID es el sensor de campos magnéticos más sensible del mundo. La calibración cuidadosa, efectuada de varias maneras, de la señal de salida del SQUID determinó que había exactamente un cuanto de semiflujo en el anillo tricristalino. Se utilizaron como control anillos hechos con un número par de uniones. No mostraron cuantos de flujo (porque el signo salta un número par de veces y vuelve a su estado original).

Además, nuestro grupo alteró un poco las condiciones para que se viese que los resultados indicaban realmente la simetría de la función de onda de los pares de Cooper y que no los causaba ningún otro fenómeno físico. Mostramos que con pequeños cambios de la geometría de los anillos el cuanto de semiflujo espontáneo aparecía y desaparecía. Al aplicar un campo magnético débil conseguimos también que los otros anillos atrapasen múltiplos enteros de cuantos de flujo, lo que demostraba que, en efecto, todos los anillos funcionaban. Los experimentos con películas y discos donde no se habían grabado patrones, además de con anillos, manifestaron también el cuanto de semiflujo; se probaba así que el resultado deriva de la simetría intrínseca del superconductor y no de los detalles de la geometría de la muestra.

4. LA BRUSCA SUBIDA DE LAS TEMPERATURAS CRITICAS de los superconductores se debió a los cupratos. Ninguno de los mecanismos teóricos propuestos descarta la superconductividad a temperatura ambiente, pero no se han visto todavía signos irrefutables de ella.



5. NUEVOS Y VIEJOS MODELOS de la superconductividad. Aquí descritos muy simplificados, se basan todos en el emparejamiento de los vehículos de la carga. En el modelo viejo, que explica la superconductividad de baja temperatura, un electrón produce fonones: distorsiones de la red de iones positivos. Los fonones atraen un segundo electrón. En el modelo de la onda de espín, una de las teorías nuevas, un vehículo de carga altera el espín magnético de un ion, que cambia a su vez el de un vecino; así se atrae a un segundo vehículo de carga, de espín opuesto.

A lo largo del año pasado repetimos estos experimentos con otros tres cupratos: el óxido de bismuto, estroncio, calcio y cobre (en cierto sentido más complejo que el YBCO), el óxido de gadolinio, bario y cobre (más o menos tan complejo como el YBCO) y un superconductor de óxido de talio, bario y cobre (más simple que el YBCO). Obtuvimos los mismos resultados. Nuestros experimentos, y los hechos en la Universidad de Illinois, el Instituto Politécnico Federal de Zurich y la Universidad de Maryland, son coherentes con la simetría de onda d.

Hoy caben pocas dudas de que las funciones de onda superconductoras exhiben la simetría de onda d. (Algunos experimentos comunicaron una simetría de onda s, pero ello podría explicarse porque, en ciertas circunstancias, un cuprato combina los dos tipos de simetría.) Este resultado significa que, como se podía esperar, el modelo BCS corriente con el que se explicaba la superconductividad no es correcto para los superconductores de alta temperatura. Significa además que las ondas de espín siguen siendo un mediador viable del emparejamiento.

Casi todos los demás mecanismos de emparejamiento propuestos (los excitones, los polarones y otros más) podrían hacerse concordar con estos resultados. Basta con suponer que los vehículos de un par de Cooper se repelen mutuamente con fuerza. Una interacción así favorece una simetría de emparejamiento con los signos cambiados.

Con todo, las comprobaciones de la simetría pueden restringir todavía más el campo de los mecanismos de emparejamiento. Es importante que se repitan estos experimentos con otros superconductores de cuprato. Parece, por ejemplo, que el óxido de neodimio, cerio y cobre, cuando se lo dopa de forma que done electrones, presenta simetría de onda s. Esto, si fuera verdad, laboraría en contra de quienes defienden el mecanismo de la fluctuación de espín, porque muchos investigadores prefieren pensar en que un mismo mecanismo se aplique a todos los superconductores de cuprato. Querría decir además que estas sustancias son todavía más complicadas de lo que se haya imaginado. Un estudio sistemático de la simetría en función de la composición podría barrer teorías no fundadas.

Una nota positiva para quienes estén más interesados en las perspectivas comerciales: casi ninguno de los mecanismos propuestos descarta que haya superconductores a temperatura ambiente. Por ejemplo, hay cálculos hechos a vuela pluma con el modelo de la onda de espín que apuntan que se podría mantener bien la superconductividad por encima de los 20 grados, quizá hasta varios cientos de grados. Aunque la cota superior no es, sin duda, realista, la posibilidad de que haya superconductores a temperatura ambiente es un gran avance con respecto a las predicciones de la teoría BCS, que pone el límite a unos –233 grados (40 kelvins). Que se precisase cuál es el mecanismo podría ayudar a quienes andan tras la fabricación de superconductores nuevos y quieren concebir usos prácticos para ellos.

Queda mucho camino por andar antes de acotar de manera definitiva el mecanismo de emparejamiento. Pero con la búsqueda de cuantos de flujo magnéticos que atraviesen anillos se tiene una nueva herramienta poderosa que contribuirá a determinar por qué estos materiales se resisten a la explicación, aunque no a la electricidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DESIGN AND APPLICATIONS OF A SCANNING SQUID MICROSCOPE. J. R. Kirtley, M. B. Ketchen. C. C. Tsuei, J. Z. Sun, W. J. Gallagher, Lock-See Yu-Jahnes, A. Gupta, K. G. Stawiasz y S. J. Wind en *IBM Journal of Research and Development*, vol. 39, n.º 6, págs. 655-668; noviembre de 1995.

EXPERIMENTS PROBE THE WAVEFUNCTION OF ELECTRON PAIRS IN HIGH-T_C SUPERCONDUCTORS. Barbara Levi en *Physics Today*, vol. 49, n.º 1, págs. 19-22; enero de 1996.

ELECTRON PAIRS AND WAVES: TACKLING THE PUZZLE OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. Ivars Peterson en *Science News*, vol. 149, n.º 10, págs. 156-57; 9 de marzo de 1996.



Los secretos de la cerveza de alambique

Una antigua técnica de elaboración produce una bebida tan compleja, que los químicos orgánicos siguen todavía explorándola

Jacques de Keersmaecker

Durante los últimos 2000 años, la región que hoy constituye Bélgica ha sido uno de los enclaves más transitados de Europa. En el año 57 d.C., el territorio, ocupado por los celtas, fue invadido por los romanos y más tarde por los normandos. A lo largo de los siglos pasó por allí un verdadero desfile de conquistadores, incluyendo (después de los romanos) los francos merovingios, germanos, holandeses, borgoñones, austriacos, españoles, franceses y de nuevo los holandeses. De cada uno de ellos proceden los hilos, cartones y tejidos que crearon el rico tapiz de la cultura belga, con sus diversas contribuciones al arte, la cocina y, no de forma casual, la elaboración de la cerveza.

Sospechan ciertos historiadores que alguno de aquellos pueblos, posiblemente los romanos, llevaron a la región un proceso de elaboración de la cerveza que ya debía de ser antiguo cuando comenzó a florecer en el entorno de Bruselas hace muchos siglos. Durante ese proceso, el producto inicial se exponía al aire, lo que provocaba su siembra (o con mayor precisión, su inoculación), por cualquier levadura no controlada y transportada por el viento. Solamente dentro de un área aproximada de 500 kilómetros cuadrados alrededor de Bruselas y en Payottenland, valle que forma el Sena al oeste de la ciudad, se daba la mezcla adecuada de esporas suspendidas en el aire para asegurar que la fermentación espontánea fuera la correcta.

Siglos después, lo que se considera el estilo comercial más antiguo de elaborar cerveza que sobrevive, produce todavía muchas cervezas de ésas y esencialmente del mismo modo. Algunas son tipos ácidos aunque suaves; otras, que han sufrido un



1. LAS CERVEZAS de alambique, muy olorosas, se sirven siempre, en su Bélgica natal, en copas diseñadas para concentrar sus aromas. Las cervezas de alambique de frutas (de cerezas, melocotones, frambuesas o ciruelas) se ofrecen en copa alta. Las "gueuze" y "faro", más tradicionales, suelen escanciarse en vaso.

proceso más dilatado de maduración, tienen un sabor más complejo y desarrollado. Ciertas variedades se han refermentado en presencia de frutos y las hay, por fin, edulcoradas con azúcar de caña. Poseen todas un gusto peculiar, ligado al terruño, un toque leve y ligero a almizcle que denota su origen espontáneo, que a menudo constituye una sorpresa incluso para los catadores contumaces.

Es probable que en algún momento toda la cerveza fuera fruto de fermentaciones espontáneas debidas a levaduras silvestres, como las de alambique que aquí nos ocupan. Hace 5000 años, por ejemplo, los sumerios producían en Mesopotamia el *sikaru*. En lugar del lúpulo, que desconocían, los sumerios aromatizaban su elaboración con especias, como la canela. A través de los siglos, en la mayor parte del mundo quienes se dedicaban a estas tareas comenzaron a aplicar técnicas que minimizaban los azares de las levaduras silvestres, proceso que culminó en el siglo XIX con el empleo de cultivos de levaduras aisladas científicamente. La fermentación se hizo más eficiente y previsible. Pese a ello, la cerveza de alambique ha perdurado como una espléndida rareza del pasado.

En la Bélgica del siglo XVI, la cerveza de alambique se convirtió pronto en una necesidad social. En muchas pinturas de la época debidas a Brueghel el Viejo y a otros artistas flamencos, pueden verse grupos de hombres saboreando grandes jarras de cerveza de alambique, conocida entonces como cerveza amarilla. Incluso hoy una cerveza de alambique elaborada localmente en pequeñas cantidades constituye una elección acertada para las fiestas de cualquier ciudad belga.

En la actualidad, también algunos fabricantes belgas importantes producen y exportan cerveza de alambique, capitalizando las preferencias populares por las cervezas fuertes y poco comunes y por los alimentos tradicionales. Aunque las cervezas de alambique son todavía más frecuentes en Bélgica y en partes de Holanda y Francia, comienza a menudear su presencia en el resto de Europa y en ciertas zonas de Norteamérica. Sin embargo, dado que es característico de la cerveza de alambique su largo proceso de elaboración, el suministro es, en comparación, limitado. La producción total de este tipo de cerveza ronda los 370.000 hectolitros al año, lo que contrasta con los 25 millones de hectolitros anuales que salen de las cerveceras del grupo Danone, principal consorcio francés.

El interés científico por el estudio de la evolución de los gustos y aromas, así como por la investigación de las diferentes etapas de fermentación, es un fenómeno bastante reciente. Si es evidente que el perfil organoléptico de una cerveza deriva directamente de la cepa de levadura que se haya empleado, una fermentación compleja como la de la cerveza de alambique produce resultados difíciles de discriminar. El paladar característico de las cervezas de alambique es resultante de una serie de etapas donde la actividad bacteriana —excluida de la industria cervecera moderna— se superpone a la fermentación por levaduras, reduciendo las dextrinas en diferentes azúcares y dando origen a numerosos compuestos aromáticos, en concreto ésteres. La investigación iniciada en la Universidad de Lovaina a mediados de los setenta ha logrado desentrañar buena parte de la química de esta fermentación centenaria.

Ha nacido una cerveza

Se sabe tan poco sobre los orígenes de la cerveza de alambique, que hay tres versiones diferentes sobre la procedencia de la propia palabra ("lambic"). Puede venir el nombre de una de estas ciudades belgas: Lembeek, Boreht-Lombeek, Onze-Lieve-Vrouw-Lombeek o Sint-Katelijne-Lombeek. Otra posibilidad es la palabra española *alambicado*, en el sentido de cuidadosamente preparado. La creación de la cerveza de alambique se ha atribuido también al duque Juan IV de Brabante, de quien se supone que en 1428, cansado de beber siempre la misma cerveza, acertó a aplicar la idea de macerar y hervir cebada y lúpulo en una cierta vasija conocida entonces como *alambique*. La experiencia tuvo éxito y, según esta versión, la bebida resultante se conoció desde entonces como cerveza de alambique.

La antigua cerveza de alambique sin mezclas, similar a la que se consumía hace siglos, hoy sólo se encuentra en el entorno de Bruselas y en Payottenland. Acida y apenas carbónica, su sabor se acerca más al de un fino de Jerez que al de la cerveza. Son mucho más frecuentes la "gueuze", el "faro" y diversas cervezas de alambique edulcoradas y aromatizadas con frutas.

La "gueuze", como el champaña, es el producto de un proceso de fermentación secundario que acontece en botella, tras la mezcla de cerveza de alambique nueva y vieja. Al parecer, la "gueuze" no se comercializó hasta principios del siglo XIX, cuando se quiso obtener una bebida más espumosa, que se acercara más a la cerveza, apta para la exportación. Se han encontrado documentos que prueban la exportación de "gueuze" a Constantinopla y Río de Janeiro en 1844.

El "faro" es una mezcla de cerveza de alambique y "mars", líquido claro, ligeramente alcohólico, obtenido al lavar el grano parcialmente agotado del que se obtiene la cerveza de alambique. Se edulcora con azúcar moreno de caña cristalizado. El nombre se lo impusieron los soldados del emperador Carlos V, en el siglo XVI, quienes llamaban al producto "licor dorado" o "licor de cebada", *farro* en español. Las cervezas de alambique de frutas incluyen la tradicional cereza (conocida como *kriek*, la palabra flamenca para "cereza") y la frambuesa (o *framboise*, del francés). Se han utilizado también otras frutas, con diferentes grados de aceptación: melocotones, uvas, grosellas, ciruelas y piñas.

En esencia, todas las cervezas —con la posible excepción de la de alambique— son "ale" o "lager". Comparten ciertos ingredientes básicos, como la malta y el lúpulo. La malta está constituida por semillas de cebada puestas a remojo en agua, que después de germinar se han secado al horno. Si el secado se prolonga y se realiza a alta temperatura, la malta pasa del color amarillo al marrón. El proceso de maduración de la malta produce, en el grano de cebada, las enzimas que transforman almidón en azúcares durante la elaboración de la cerveza. A tenor de las condiciones de tratamiento, se conseguirán distintas características; por ejemplo, la malta para la cerveza de alambique es clara de color y muy rica en enzimas. El lúpulo es una planta trepadora que se cultiva en Francia desde el siglo VIII. Su interés en la fabricación de la cerveza, a la que aporta su aroma, su amargor y digestibilidad, fue descubierto por Hildegarda, abadesa de la abadía de Bingen, en el siglo XI. Son múltiples las variedades de lúpulos, tratadas de formas diferentes. Para elaborar la cerveza de alambique se prefieren los pétalos secos de las flores (o "conos") de lúpulo.

Elaboración de la cerveza de alambique



El proceso de elaboración se inicia cuando se macera una mezcla de malta de cebada y trigo con agua caliente en una cuba de maceración ("cuve-matière"). Los discos metálicos que observamos remueven la infusión, ayudando a extraer de los granos los compuestos aromáticos y las enzimas. Se añade entonces agua caliente a esta mezcla, llamada "mosto", y luego se decanta el líquido en una caldera de mosto, donde se calienta para activar las enzimas.

Terminadas ambas operaciones, se procede a la filtración. Las válvulas (*abajo*) controlan la velocidad del flujo a través de los filtros, con lo que puede obtenerse la textura que se desee.



En el principio, el mosto

Todas las cervezas inician su andadura de la misma forma. Una vez seco, el grano malteado se muele. Pueden emplearse también granos sin maltear de maíz, arroz o trigo como fuente de materias amiláceas (almidón). Tras la molienda se agrega a estos granos agua caliente (cuya calidad contribuye al sabor final) en un proceso de calentamiento controlado para que las enzimas de la malta no se desnaturalicen: es el proceso de mezcla.

El líquido resultante de la mezcla se denomina mosto. Tras filtrarlo, se transfiere a una caldera de mosto. En ella, la mezcla de malta, grano y agua se hierve con el lúpulo (y a veces también con especias) durante una hora o más, poniendo los fundamentos para los dos elementos básicos del sabor final de la cerveza: el afrutado y dulce, de la malta y el grano, y el seco y amargo, del lúpulo.

Tras esta etapa llega la fermentación, en la que colonias de levaduras, organismos vivos unicelulares, disocian los azúcares producidos por la malta y el grano y los transforman en etanol, dióxido de carbono y otros compuestos. La fermentación tiene lugar en ausencia de oxígeno.

Existen cepas de levaduras muy diferentes, cada una de las cuales confiere un aroma característico. En efecto, una de las muchas distinciones entre las cervezas ale y lager es el tipo de levadura sembrado en el mosto; según la clase utilizada, la levadura se sitúa cerca de la superficie (ale) o del fondo (lager) de la cuba después de la fermentación. Los fabricantes guardan celosamente sus cepas de levaduras por la importante función de éstas en la obtención del sabor y aroma de la cerveza.

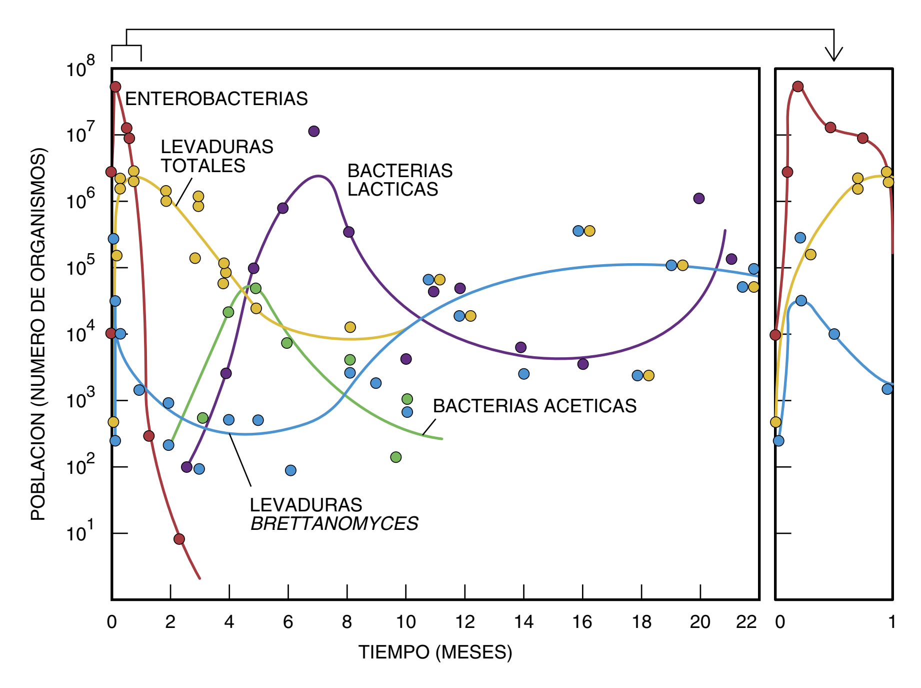
Al ser similares todas las fabricaciones, la diversidad entre cervezas se deberá a determinados matices del proceso de elaboración: clases y proporciones de agua, malta, cereales, lúpulo y levadura, la duración del proceso de mezcla y de la fermentación, la maduración y quizá también de las mezclas posteriores. Quienes elaboran cerveza de alambique suelen ser muy celosos en la custodia de las recetas que han ido mejorando década a década, siglo tras siglo.

Algunas diferencias importantes distinguen la cerveza de alambique del resto. Por ejemplo, en la mezcla de elaboración hay siempre una proporción bastante alta de trigo crudo, en torno al 35 por ciento, mientras que las cervezas alemanas, por contra, nunca emplean grano sin maltear. Este



Después de la filtración, el líquido se hierve unas cuatro o cinco horas, tiempo durante el cual se añade el lúpulo. Para la cerveza de alambique, suelen preferirse los pétalos secos de la flor (*abajo izquierda*), a menudo procedentes de Inglaterra. El lúpulo libera compuestos que aseguran la conservación y el aroma del producto final. El lúpulo envejecido evita que la cerveza adquiera un amargor excesivo. Durante la ebullición, se toman muestras (*abajo*) para medir la concentración de azúcares.





2. LA FERMENTACION de la cerveza de alambique se ajusta a las subidas y descensos que se producen en las distintas poblaciones de levaduras y bacterias, a lo largo de cuatro etapas básicas. En la primera predominan las enterobacterias y las levaduras de aparición espontánea, que transforman la glucosa en etanol, dióxido de carbono y ácidos. Más tarde, diversas levaduras producen más etanol. En la tercera etapa, las bacterias lácticas y acéticas originan una mayor cantidad de estos ácidos respectivos. Por último, las levaduras *Brettanomyces* crean numerosos ésteres que conforman el aroma singular de esta cerveza.

cereal es rico en proteínas y almidón, habitualmente poco deseables en la producción. El alto contenido en proteínas da una ligera turbidez a la cerveza de alambique, pero al propio tiempo favorece una espuma persistente.

Además, los almidones de trigo originan altos niveles de dextrina, un tipo de carbohidrato imposible de descomponer por la levadura. La actividad bacteriana reduce de manera progresiva tales concentraciones: en la cerveza de alambique cuya fermentación sea inferior a un año las dextrinas producen una suavización; pasados tres años de reserva, las dextrinas desaparecen. Por último, el trigo no malteado es pobre en enzimas necesarias para una elaboración correcta; por esa razón los fabricantes de cerveza de alambique confían en la malta de cebada, de alto contenido enzimático.

La elaboración de cerveza de alambique hace también un uso peculiar del lúpulo. En este antiguo estilo de producción, el lúpulo no sólo aromatiza, lo mismo que en las demás cervezas, sino que actúa además de conservante; sus resinas contienen compuestos que inhiben la proliferación de las bacterias que pudrirían el mosto, rico en azúcares y en otras substancias energéticas. La buena conservación requiere cantidades notables de lúpulo. En condiciones normales, dichas cantidades harían demasiado amarga la cerveza, de modo que los fabricantes de cerveza de alambique utilizan sólo lúpulo envejecido al menos durante tres años.

El envejecimiento provoca que los alfa-ácidos, fuente principal del sa-



Acabada la prolongada ebullición, el líquido se bombea a una balsa de enfriamiento en el ático de la fábrica (*izquierda*). Este es el punto clave y peculiar de la producción de la cerveza de alambique, y en el que se asiste a la inoculación por levaduras silvestres y otros microorganismos de la flora ambiente. Los ventiladores hacen circular el aire mientras la temperatura del líquido desciende hasta unos 15 ºC (*arriba*).

bor amargo, se oxiden, rebajando así este sabor. El envejecimiento provoca también la oxidación de las resinas del lúpulo y desarrolla aromas desagradables a heno y queso, pero la prolongada ebullición elimina tales olores. La variedad de lúpulo preferida ha sido tradicionalmente la llamada Coigneau, cultivada en la zona de Asse-Alost. Sin embargo, la producción belga es escasa, por lo que a menudo el lúpulo que se utiliza procede de la región inglesa de Kent.

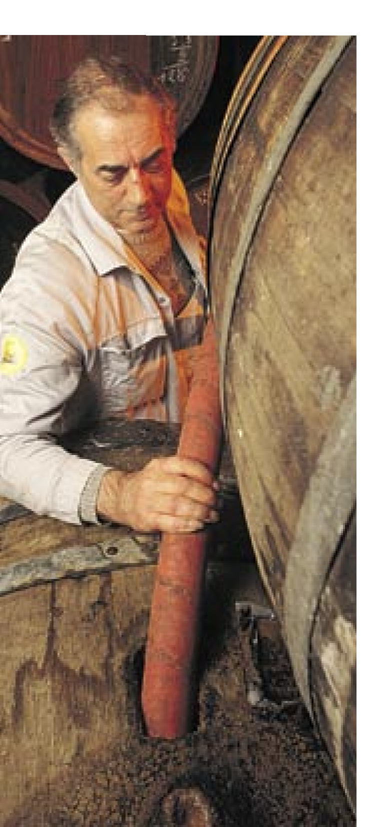
El método tradicional de elaboración de la mezcla, llamado de maceración turbia, apenas ha cambiado desde que el industrial G. Lacambre lo describiera en un libro fechado en 1851. En una cuba de grandes dimensiones (la "cuve-matière") se macera una mezcla con el 40 por ciento de trigo y el 60 por ciento de malta de cebada, en cifras aproximadas, con agua a 40-45 grados centígrados. Se añade agua hirviendo hasta alcanzar los 62 grados, después de lo cual el líquido se decanta en una caldera de mosto. En la cuba de maceración se vierte más agua hirviendo hasta alcanzar una temperatura de 72 grados y se macera la masa por segunda vez. Tras una nueva decantación, la fracción líquida se agrega a la caldera de mosto. El contenido de esta caldera (el líquido procedente de las dos decantaciones sucesivas) se hierve durante 20 minutos y se vierte de nuevo en la cuba de maceración para su filtración.

El mosto resultante de esta filtración continúa el proceso para convertirse en cerveza de alambique. Los restos que quedan en la cuba se lavan con agua caliente y forman un segundo mosto, distinto, para elaborar "mars" (una especie de recuelo). El mosto destinado a producir cerveza de alambique vuelve a la caldera de cocción, se le añade flor de lúpulo y se le pone a hervir durante cuatro o cinco horas. (Mediante un proceso similar, se produce el "mars".) Cuando los mostos han hervido bien, se realiza una filtración para eliminar el lúpulo.

Así termina la fase de preparación o mezcla y comienza la fermentación. Esta última se desarrolla a través de una serie de reacciones químicas, bacterianas y promovidas por levaduras que conducen a la creación de la cerveza de alambique. Se inicia con la impronta peculiar de la cerveza de alambique, caso único en la fabricación de cervezas: el bombeo del mosto caliente hacia una gran balsa de enfriamiento, abierta y poco profunda, instalada en el ático de la fábrica. El local tiene ventanas abiertas, y está dispuesto con ventiladores para mejor aireación. El líquido expuesto se enfría y resulta inoculado por las levaduras y otra flora microbiana presente en el aire. Esta exposición se conoce con el nombre de "siembra".

Las condiciones locales revisten una importancia decisiva para la siembra. No sólo la fermentación espontánea subsiguiente tiene lugar de forma homogénea en un área pequeña del entorno de Bruselas, sino que únicamente se produce desde octubre hasta abril, cuando la temperatura ambiente está por debajo de los 15 grados. Según parece, pequeñas variaciones en las condiciones podrían afectar el equilibrio de la flora microbiana y la velocidad de crecimiento de los microorganismos, alterando, en consecuencia, el producto final. Es objeto de controversia el margen de variación aceptable de esas condiciones. Se cuenta la historia de un cervecero que hubo de reparar un tejado desvencijado y estaba convencido de que allí se albergaban colonias importantes de microorganismos. Consecuente con ello, en lugar de reemplazar el tejado viejo, construyó otro nuevo por encima del primero.

Cuando el mosto inoculado se ha enfriado, los operarios lo vierten en toneles de madera, donde se produce la fermentación y la maduración. Usan siempre toneles de roble o de castaño que hayan contenido previamente vino, porque los toneles de madera nuevos provocarían un sabor a tani-



Concluido el enfriamiento, normalmente durante la noche, el líquido se vierte en toneles de madera (*izquierda*) que hayan servido para fermentar vino. (La madera de los toneles nuevos comunica un sabor desagradable.) Incluso después de lavados y fumigados, estos toneles contienen esporas de levaduras que ayudan a iniciar la fermentación. Transcurrida una semana, la fermentación es tan violenta, que a través de las válvulas de escape surge con fuerza la espuma (*abajo*).





La cerveza envejece durante uno o dos años. Entonces, sobre la única base del sabor, el fabricante decide su mezcla con cervezas de alambique de mayor o menor edad.

JACQUES DE KEERSMAECKER dirige la fábrica de cervezas Belle-Vue de Bruselas, filial del grupo Interbrew-Labatt. Experto aventurero en el mundo de los sabores, nació en una fábrica de cerveza de alambique y estudió en la Escuela Meurice de Cervecería de Bruselas. Con anterioridad fue director de la compañía Lamot en Mechelen, Bélgica.

nos. (El vino extrae los taninos en el curso de su maduración.) Antes de llenar los toneles, se raspan y lavan, quemando en su interior mechas de azufre para eliminar ciertos mohos que conferirían un sabor desagradable. Incluso después de limpiar y fumigar, quedan células vivas de levaduras, y también esporas, en las fibras de la madera, las cuales ayudan a iniciar la fermentación.

La fermentación, ya de por sí compleja cuando se trata de cervezas normales, lo es mucho más cuando actúan las levaduras silvestres y las bacterias que dan lugar a la cerveza de alambique. La actividad bacteriana no presenta riesgos para la salud humana, porque la acidez del líquido y la presencia de las resinas del lúpulo se combinan con el alcohol para evitar la proliferación de microorganismos patógenos. Esta propiedad, por cierto, ayuda a explicar la razón de que la cerveza salvara de epidemias e intoxicaciones a tanta gente de la Edad Media.

En la Universidad de Lovaina, Hubert Verachtert y sus colaboradores vienen estudiando desde los años setenta la química orgánica de la fermentación de la cerveza de alambique. Han logrado identificar, en un solo tipo de esta cerveza de alambique, 100 cepas diferentes de levaduras, 27 cepas de bacterias acéticas (que forman ácido acético en presencia de oxígeno) y 38 cepas de bacterias lácticas (que forman ácido láctico en condiciones anaerobias.)

Un festín de levaduras

La fermentación de la cerveza de alambique comprende cuatro etapas principales, que en parte se solapan. En la primera dominan levaduras silvestres (*Kloeckera apiculata*) y enterobacterias. Estas bacterias producen un aroma dulce, a frutas o verduras en general. Las levaduras *Kloeckera* tienen escasa influencia sobre el sabor, pero promueven el desdoblamiento enzimático de las proteínas, lo que favorece el brillo de la cerveza a bajas temperaturas. En la segunda etapa actúan otras levaduras (*Saccharomyces*), que producen todo el etanol que contendrá el producto final y crean ésteres aromáticos que confieren a esta cerveza un aroma similar al de la ale. En la tercera etapa, las bacterias lácticas ejecutan la labor más interesante: producen el ácido láctico que otorga a esta cerveza su leve acidez característica. Por último, las levaduras *Brettanomyces* dan lugar a numerosos ésteres adicionales, que ofrecen a la cerveza de alambique su aroma y sabor a vino afrutado.

La primera etapa de la fermentación comienza entre el tercero y séptimo días, con la proliferación de las enterobacterias y las levaduras silvestres. Las enterobacterias se multiplican con gran rapidez y desencadenan una fermentación ácida mixta, en la que la ruptura de las moléculas de glucosa no sólo produce etanol y dióxido de carbono, sino también ácido láctico y ácido acético. Precisamente porque las bacterias entéricas no pueden sobrevivir en ácido acético o etanol, su población disminuye hasta desaparecer a los 30 o 40 días. La *K. apiculata* se alimenta a partir de la transformación de la glucosa, pero no puede hacer lo mismo con los azúcares más complejos, por lo que desaparece con gran rapidez cuando no queda glucosa. Antes de hacerlo, sin embargo, su presencia produce una pequeña cantidad de etanol y genera casi todo al ácido acético que se encuentra en el producto final.

A los 10 o 15 días se inicia la fermentación principal, responsable de la producción de alcohol etílico. En este punto, la población de levaduras silvestres resulta eclipsada por la proliferación de *Saccharomyces*, del mismo género taxonómico que el de las levaduras que se emplean en la fabricación de las cervezas de fermentación alta "ale" (*S. cerevisiae*) y el de las cervezas "lager" (*S. carlsbergensis*), de fermentación baja. Estos dos tipos de cerveza fermentan solamente durante una semana.

En la cerveza de alambique, las levaduras *Saccharomyces* asimilan y fermentan la mayoría de los azúcares del mosto, que transforman en alcohol etílico y dióxido de carbono. La fermentación se manifiesta durante un par de días en forma tumultuosa produciéndose derrames de espuma fuera del tonel, con cráteres que deja el dióxido de carbono al desprenderse. Esta etapa continúa, ya de forma pausada, unos siete meses. Esa fermentación no es la que produce los aromas característicos de la cerveza de alambique, aunque sí coloca al mosto en unas condiciones que permiten su mezcla.

La tercera etapa, que se solapa con la anterior, comienza a los tres o cuatro meses. Este período se caracteriza por la proliferación de bacterias lácticas y acéticas, que alcanzan su máximo entre los seis y ocho meses desde el comienzo de la fermentación. Otra razón para iniciar la elaboración de esta cerveza entre octubre y abril es que de esta forma dicho máximo de actividad quedará asegurado por los calores estivales, cuando los termómetros marquen por encima de los 20 o 25 grados.

Las bacterias son responsables del sabor a vino agrio de la cerveza de alambique. Pertenecen en su mayoría al género *Pediococcus*, que convierte los azúcares en ácido láctico. Por desgracia, algunas cepas de *Pediococcus* tienden a formar posos. Es normal que éstos desaparezcan, aunque persiste cierta turbiedad que no puede eliminarse por filtración.

Las bacterias acéticas también cuentan con efectos indeseables, tendiendo a crear cervezas muy ácidas ("fuertes"), al producir ácido acético a partir del etanol. Tales problemas sólo llegan a ser importantes en el caso de toneles en mal estado o perforados que se han dejado al aire, en las que se desarrolla la bacteria aeróbica *Acetomonas*.

Tras ocho meses de fermentación, un nuevo incremento de las células de levaduras significa el comienzo de la cuarta y última etapa en la compleja fermentación de la cerveza de alambique. Estas cepas de levaduras, identificadas por primera vez en la cerveza de alambique, pertenecen sobre todo a *Brettanomyces*. Desempeñan un papel crítico en el establecimiento del perfil aromático de esta cerveza y por tanto de su sabor. El perfil aromático resulta determinado principalmente por diversos ésteres de la cerveza que a su vez son producidos por *Brettanomyces*. Estas levaduras producen una enzima que promueve las reacciones que transforman los ácidos y el alcohol en ésteres (y viceversa, fenómeno este último conocido como hidrólisis). Los ésteres con mayor influencia aquí son el lactato de etilo y el acetato de etilo, subproductos de los ácidos láctico y acético de la etapa precedente.

En presencia de aire, las levaduras *Brettanomyces* forman, con otras, una película sobre la superficie de la cerveza. Sin esa membrana, la cerveza se oxidaría y las bacterias acéticas continuarían proliferando hasta producir

vinagre en lugar de cerveza. Pese a los esfuerzos de los fabricantes, esto sucede de cuando en cuando.

Otra fermentación

Pese a esta compleja y prolongada fermentación, que dura todo un año, en general la cerveza no está lista para el consumo. Como antes se mencionó, la cerveza de alambique menos aromática, la "gueuze", es una mezcla de cerveza vieja y nueva, en una gama que va desde su sabor suave (cuando domina la fracción joven) hasta el ácido y complejo (en su mayor parte vieja). La mezcla exacta se decide sin más criterio que el sabor. Se asiste entonces a una fermentación complementaria, puesto que los azúcares presentes en una cerveza de alambique joven, de alrededor de un año, entran en contacto con una serie de levaduras más desarrolladas en una cerveza que ya tiene dos o tres años. Según el método tradicional, esta nueva fermentación tiene lugar en la botella.

Si predomina la cerveza de alambique vieja, las levaduras *Brettanomyces* asimilan los azúcares complejos, formando un producto muy seco y aromático (en razón de la actividad éster de las levaduras *Brettanomyces*). Esas cualidades serían menos intensas en una mezcla más joven, que resultaría más suave. Los equipos de cata deben ser conscientes de los hábitos de consumo y obtener un producto final completamente consistente mediante la mezcla de cervezas muy heterogéneas. En cualquier caso, esta cerveza difiere de las ale y las lager, sobre todo por su contenido en ácidos orgánicos y por su compleja variedad de ésteres.

La mayor parte de la producción se concentra en bebidas suaves, que se filtran y pasteurizan. Las mezclas viejas, refermentadas en botella, exigen una manipulación cuidadosa y el almacenamiento al menos de un año, en una bodega oscura y fresca.

Las cervezas de alambique afrutadas experimentan también una fermentación secundaria, propiciada por los azúcares de la fruta. La de cereza quizá sea la más tradicional. Antaño se echaban cerezas ácidas de la variedad Schaarbeek, pero acaban de desaparecer del mercado. Los fabricantes suelen emplear las Gorsem, que son más gruesas y jugosas y proporcionan un sabor más dulce. En la época de recolección de las cerezas, en julio, los operarios preparan las barricas necesarias para toda la producción de *kriek* del año. En cada barrica de 650 litros ponen unos 80 kilogramos de fruta sin deshuesar y vierten cerveza de alambique joven, de esa misma estación. La fermentación, iniciada de nuevo, durará uno o dos años.

¿Hay futuro para la cerveza de alambique?

Esta cerveza es un anacronismo viviente. Las mismas características que la convierten en una cerveza única son al propio tiempo graves inconvenientes desde el punto de vista comercial. Con anterioridad a la obra de Louis Pasteur, ésta era la única cerveza que podía conservarse durante meses e incluso años. Con costes operativos relativamente bajos, los fabricantes podían producir en invierno grandes cantidades y vender el producto a lo largo del año. Aunque la conservación no entraña ahora ningún problema, las grandes cantidades de la bebida que deben madurar durante meses o años significan la inmovilización de buena parte del capital de los cerveceros.

Además, muchas leyes y normas modernas de aplicación en alimentos requieren un control minucioso del proceso entero de elaboración. Por su propia naturaleza, sin embargo, una fermentación espontánea no es controlable en toda su extensión.

El futuro de la cerveza de alambique está en manos de amantes arriesgados de la cerveza, de ese pequeño pero entusiasta segmento de la población que gusta probar los alimentos tradicionales populares. Ultimamente este grupo parece ampliarse porque son más quienes renuncian a los modernos alimentos preparados en favor de los clásicos: quesos de leche cruda, pan de leña, vinos y cervezas de monasterio. ¿Quién sabe? Si la tendencia persiste, quizá la cerveza de alambique perdure otros 500 años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LES MÉMOIRES DE JEF LAMBIC. La Technique Belge Editions, Bruselas, sin datación.

LAMBIC. Jean-Xavier Guinard. Classic Beer Style Series. Brewers Publications, Boulder, Colorado, 1990.

MICHAEL JACKSON'S BEER COMPANION. Michael Jackson. Running Press, 1993.

LAMBIC: BELGIUM'S UNIQUE TREASURE. Martin Lodahl en *Brewing Techniques*, vol. 3 n.º 4, páginas 34-46, julio-agosto 1995.

Velocidades superlumínicas y causalidad

La teoría einsteiniana de la relatividad prohíbe que las partículas o las ondas se propaguen con velocidad superior a la de la luz en el vacío. La mecánica cuántica admite, en cambio, ese fenómeno

Rolf Tarrach

Uno de los corolarios más conocidos, y más importantes también, de las leyes del electromagnetismo, resumidas por James C. Maxwell en famosas ecuaciones, es la predicción de la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan con velocidad constante en el vacío. Esta velocidad, *c*, no depende ni de la intensidad, ni de la frecuencia de las ondas; tampoco, por consiguiente, de su longitud de onda, que es razón entre la velocidad y la frecuencia.

Resulta, además, que dicha velocidad constante en el vacío es igual a la de propagación de la luz. Ole Romer dio ya un valor de ésta en 1676. El astrónomo danés vio en el Observatorio Real de París que el tiempo transcurrido entre eclipses de las lunas de Júpiter por el planeta se acortaba conforme la Tierra se acercaba a Júpiter, intervalo que se alargaba a medida que ambos planetas se alejaban entre sí. Romer atribuyó ese fenómeno al tiempo que la luz necesitaba para recorrer la distancia entre Júpiter y la Tierra. De acuerdo con sus observaciones, concluyó, la luz se propagaba a una velocidad de 225.000 kilómetros por segundo.

ROLF TARRACH es catedrático de física teórica de la Universidad de Barcelona. Su campo de investigación es la teoría cuántica de campos y aspectos avanzados de la mecánica cuántica. En particular ha trabajado en diversos temas de electrodinámica cuántica, cromodinámica cuántica, trivialidad, grupo de renormalización, mecánica cuántica de alones y vacíos modificados. Ha publicado cerca de un centenar de artículos.

Todas las ondas electromagnéticas (las de radio, micrométricas, infrarojas, luz del espectro visible, ultravioleta A y B, rayos X blandos y duros, rayos gamma, etcétera) se propagan en el vacío con la misma velocidad: a 299.792.458 metros por segundo. Ese valor de *c* se estableció en 1983, año en que se decidió utilizar su carácter de constante universal para definir el metro a partir del segundo. Hasta entonces se venía definiendo el metro y el segundo con sus respectivos patrones, para medir luego *c* con ellos. De ese modo, una magnitud básica, la longitud, pasaba a ser magnitud derivada.

La consideración de constante universal le vino a la velocidad de la luz de la mano de la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein. Enunciada ésta en 1905, no sólo postula la independencia de *c* respecto de la frecuencia de la onda electromagnética, sino también respecto del estado de movimiento del observador, siempre que éste sea inercial. (Llámase observador inercial aquel para el cual todas las fuerzas tienen una causa física independiente del mismo.) En virtud de dicha independencia, dos observadores inerciales, en movimiento de velocidad constante uno respecto del otro, siempre medirán la misma velocidad de propagación de la luz aunque, debido al efecto Doppler, percibieran la luz con color diferente. (La versión más familiar de ese efecto se produce en el sonido, que se eleva, aumenta la frecuencia, a medida que la fuente emisora se acerca a nosotros.)

En el ejemplo de los dos observadores inerciales deja de ser válida la ley clásica de adición de velocidades, que tan buen resultado nos da al caminar sobre la cinta transportadora del aeropuerto. Pero la relatividad especial nos dice más. Toda partícula dotada de masa se mueve con una velocidad que es siempre inferior a *c*; ahora bien, todo transporte de energía y toda transmisión de información utilizan como vehículo partículas materiales u ondas electromagnéticas; por tanto, concluye Einstein, ninguna velocidad asociada al transporte de energía o a la transmisión de información puede superar la velocidad de la luz en el vacío. La teoría general de la relatividad, creada por Einstein en 1915, refuerza y generaliza estos resultados.

En física, la noción de causalidad viene condicionada por la idea de velocidad máxima, insuperable, que caracteriza a la propagación de la luz en el vacío. Para entenderlo, imaginemos que en este instante preciso estallase el Sol, fenómeno que comportaría trágicas consecuencias en la Tierra. Desde aquí tardaríamos ocho minutos en percibir la explosión; o lo que es lo mismo: en ese intervalo de ocho minutos, la Tierra no se resentiría en absoluto de cualquier efecto derivado del estallido solar.

¿Qué ocurriría si hubiera velocidades de propagación superiores a la de la luz? Se producirían situaciones muy curiosas. La más espectacular es, sin duda, la posibilidad de violar la ley de la causalidad, dependiente como hemos visto de *c*. Estaríamos ante lo que coloquialmente se conoce como paradoja del abuelo. Si hubiesen causas (y por tanto efectos) que se propagasen a velocidad superior a *c* en ciertos sistemas de referencia, podrían aquéllas propagarse hacia atrás en el tiempo para ciertos observadores inerciales. Semejante situación permitiría que yo convenciese a mi abuelo, enviándole un mensaje que recibiría en su juventud, de las ventajas del celibato y, por tanto, podría, con

mis ideas, impedir que yo naciera. La paradoja es palmaria: impedir la existencia del nieto por el propio nieto.

Horizonte de partículas

Pese a las paradojas de ese tenor, la física reconoce la existencia de muchas velocidades que superan la de la luz. Acudamos a otro ejemplo. Nos lo proporciona nuestro universo y basta con percibirlo. El modelo estándar del universo, la teoría de la gran explosión ("big bang"), presenta tres predicciones coherentes con la observación astronómica y las mediciones astrofísicas: velocidad de expansión del universo, radiación de fondo y composición química del cosmos.

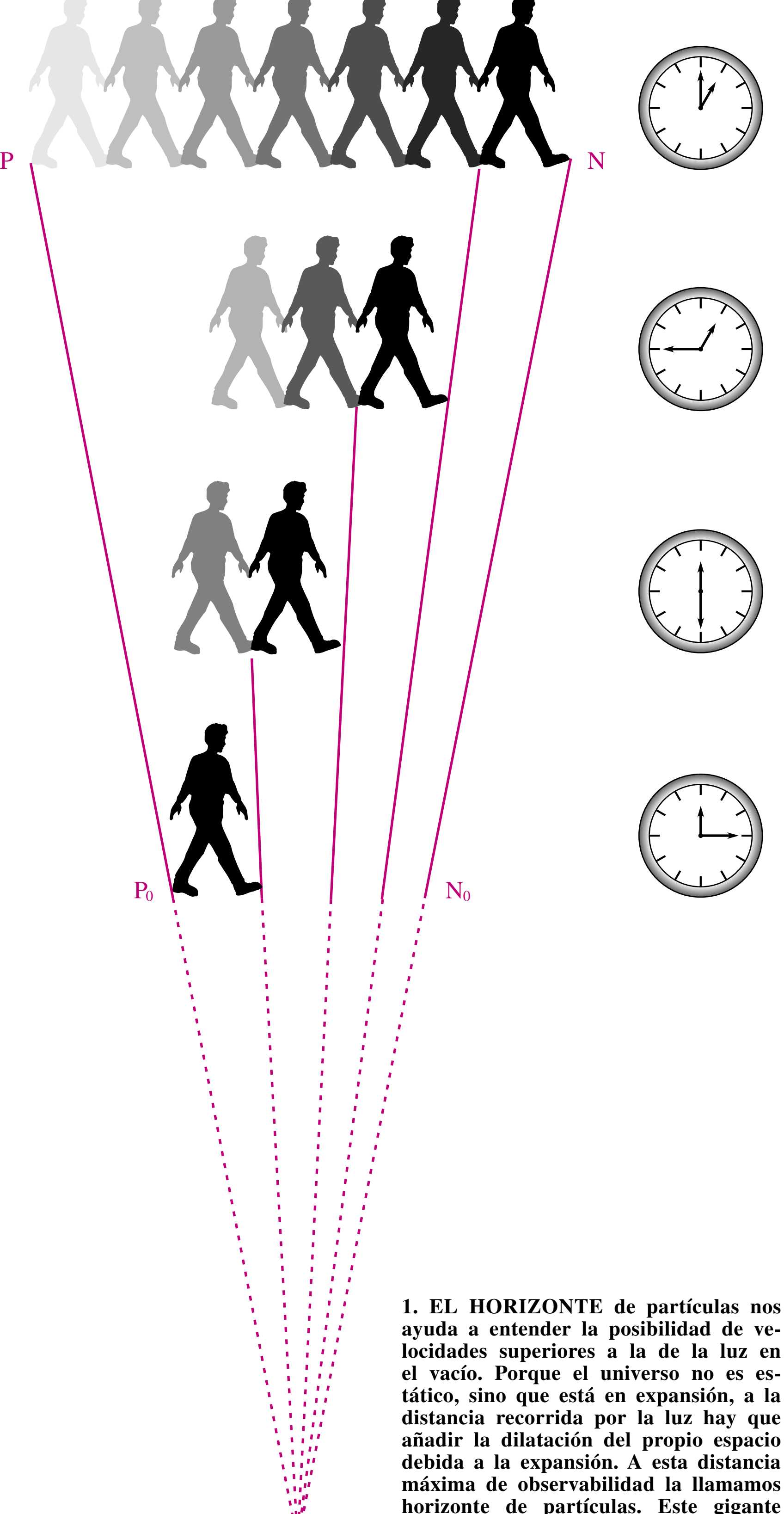
La velocidad de expansión del universo se mide por la constante de Hubble, así llamada en honor de Edwin Hubble. Para cualquier galaxia, dicha constante es su velocidad de alejamiento (o recesión) dividida por la distancia a que se encuentra de nosotros, cociente que se expresa en kilómetros por segundo y por megaparsec; vale (70 ± 30) km $\times$ s^{-1} por cada megaparsec de distancia. Un megaparsec (3×10^{22} m) es la unidad de distancia astronómica que equivale a un millón de parsecs, es decir, 3.262.000 años luz.

La segunda predicción es la radiación de fondo remanente del momento en que se formaron los átomos, lo que ocurrió cuando el universo tenía algunos centenares de miles de años de edad. Esta radiación, que desde entonces ha evolucionado sin apenas interactuar con la materia del universo, la ha medido con mucha precisión el satélite *COBE* y corresponde a una temperatura actual del universo de unos tres grados kelvin; exactamente, $(2{,}726 \pm 0{,}010)$ K.

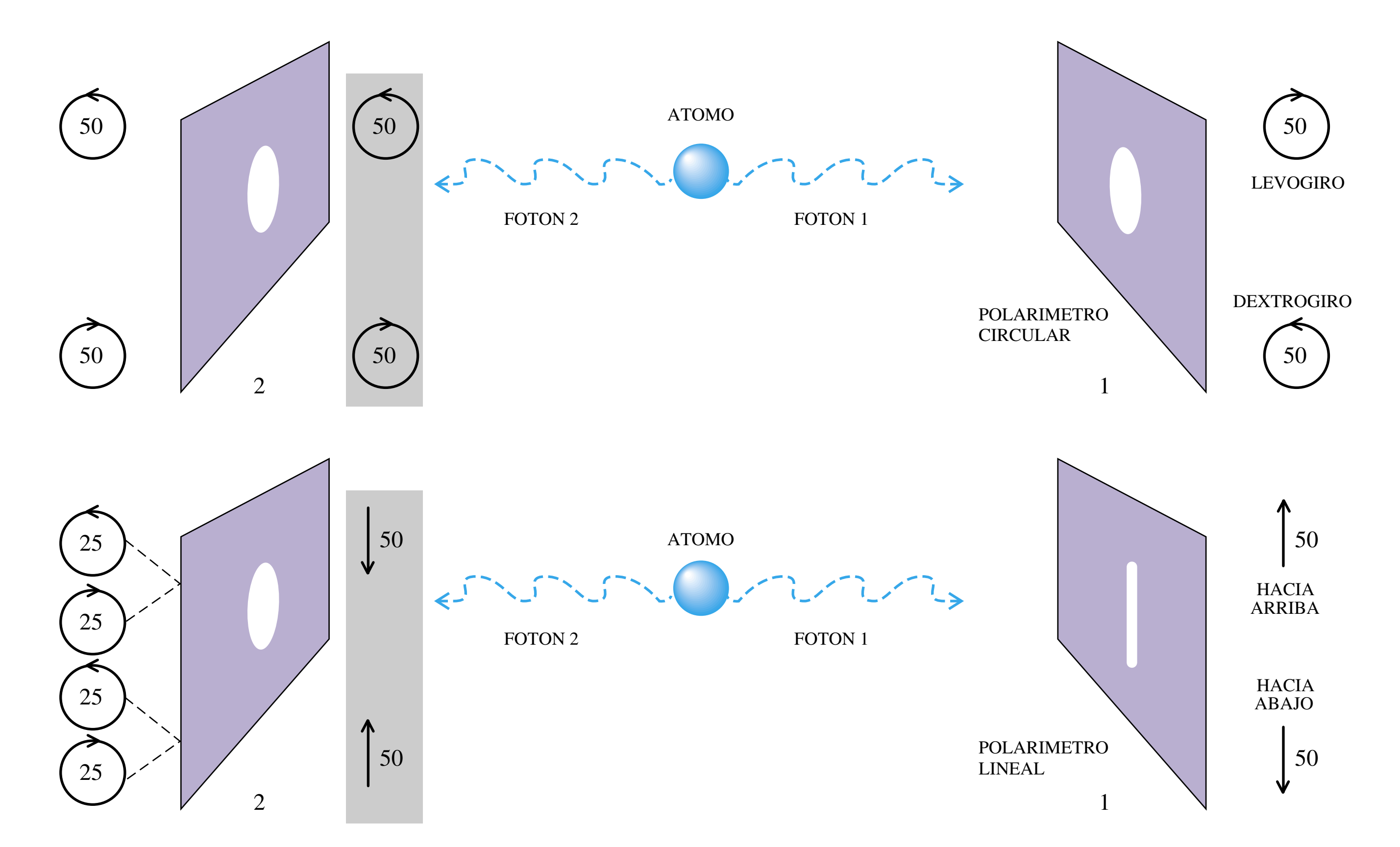
La tercera predicción se refiere a la composición química del universo tal como quedó fijada en la era de la nucleosíntesis, o de formación de los núcleos atómicos. El universo tenía entonces unos tres minutos de edad. Sobre tal composición podemos afirmar, *grosso modo*, que un 25 % de la masa actual del universo es de helio y un 75 % de hidrógeno.

Consideremos ahora los puntos más lejanos del universo que podamos, en principio, observar. Si el universo fuese estático, como se creía a principios de siglo, esta distancia máxima de observación sería simplemente *ct*, donde *t* representa la edad del universo; esa edad corresponde a la distancia que ha recorrido la luz emitida en los primeros instantes del universo.

Pero el universo no es estático, sino



1. EL HORIZONTE de partículas nos ayuda a entender la posibilidad de velocidades superiores a la de la luz en el vacío. Porque el universo no es estático, sino que está en expansión, a la distancia recorrida por la luz hay que añadir la dilatación del propio espacio debida a la expansión. A esta distancia máxima de observabilidad la llamamos horizonte de partículas. Este gigante sólo ha tenido tiempo para dar cuatro zancadas en un universo en expansión, pero la distancia a la que está ahora su punto de partida P de nosotros, que nos encontramos en N, es de siete zancadas. El punto P dista ahora de N un intervalo superior a la distancia recorrida por el gigante. P es nuestro horizonte de partículas.



2. BASTIDOR EXPERIMENTAL para poner de manifiesto una paradoja cuántica, la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen. Consta de tres componentes esenciales: una fuente emisora (átomo) y dos polarímetros (1 y 2). El átomo emite dos fotones en sentidos opuestos, que entran en los polarímetros 1 y 2. El polarímetro 1, sea circular o lineal, siempre obtiene con la misma probabilidad (50 por ciento) los dos resultados posibles de la medida: levógiro o dextrógiro y hacia arriba o hacia abajo. El polarímetro 2, cuyo tipo hemos escogido al azar, es aquí circular; con independencia del tipo de polarímetro que sea el 1, siempre da con la misma probabilidad polarizaciones levógiras y dextrógiras. La zona sombreada contiene la información que refleja el tipo de polarímetro que se ha escogido en 1 y que el polarímetro 2 no es capaz de reconocer. La información no se transmite instantáneamente. La paradoja cuántica estriba en que los dos fotones, aunque estén espacialmente separados, no pueden describirse cada uno por su lado hasta que una medición realizada sobre uno de ellos no fuerce un hiato entre los dos.

que se halla en expansión desde los primeros instantes de su existencia. Por mor de esa expansión, los puntos más lejanos que podemos observar no están a una distancia *ct*, sino entre 2 y 3 veces dicha lejanía; en efecto, a la distancia recorrida por la luz hay que añadir la dilatación del propio espacio debida a la expansión. A esta distancia máxima de observabilidad la llamamos horizonte de partículas. Tenemos, pues, que mi horizonte de partículas se aleja de mí a una velocidad entre *2c* y *3c*, una velocidad, por consiguiente, muy superior a la de la luz. No se trata, pues, de la clásica velocidad de un punto medida con los patrones de distancia y tiempo vigentes en un instante determinado, sino que incluye la velocidad con la que el propio patrón de distancia crece con respecto al vigente en instantes anteriores.

Ahora bien, ¿cómo podemos observar objetos que están a una distancia superior a *ct*? La respuesta es sencilla: la señal que observo, y que me proporciona toda la información sobre el objeto, sólo ha recorrido una distancia *ct*, pero el objeto emisor de esa luz se halla ahora a una distancia superior a *ct*.

La respuesta no contradice la teoría de la relatividad, ni la propiedad de *c* de ser la velocidad máxima con que se propagan señales o energía.

Correlaciones cuánticas

Pasemos de la relatividad a la otra teoría fundamental de la física del siglo XX, la mecánica cuántica. Para entender aquí la causalidad, recurriremos a otro ejemplo: el montaje experimental imaginario que suele idearse para presentar la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen. (Así se llama la conclusión a la que llegaron en 1935 Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen y según la cual la mecánica cuántica es una teoría incompleta.)

El bastidor experimental imaginario constará de tres componentes esenciales: una fuente emisora y dos polarímetros, o aparatos medidores de la actividad óptica. Sea un átomo que emite dos fotones en sentidos opuestos; admitamos que, al medir las polarizaciones circulares de cada uno de ellos, siempre sean también opuestas. Cuando el fotón que llega al polarímetro 1 resulta, al medir, ser dextrógiro, el otro es levógiro, y viceversa; además, ambos resultados son equiprobables. La paradoja cuántica estriba en que los dos fotones, aunque estén espacialmente separados, no pueden describirse cada uno por su lado hasta que una medición realizada sobre uno de ellos no fuerce un hiato entre los dos.

La mecánica cuántica no permite siempre describir por separado los subsistemas de un sistema. Cuando la descripción ha de ser necesariamente global, sólo la medición realizada de un subsistema nos posibilita explicarlo separado del sistema. Por tanto,

en cualquier instante considerado, podemos conocer la polarización del fotón que entra en el polarímetro 2 al medir la polarización del fotón que entra en el polarímetro 1. Quiere ello decir que el fotón que entra en el polarímetro 2 tendrá una polarización circular bien definida al medir nosotros la polarización circular del fotón que entra en el polarímetro 1.

Las cosas no cambian si sustituimos polarizaciones circulares por lineales. Así, el fotón que entra en el polarímetro 2 mostrará ahora una polarización lineal bien definida al medir el observador la polarización lineal del fotón que entra en el polarímetro 1; ambas polarizaciones lineales serán, además, opuestas. Si el fotón del polarímetro 1 presenta polarización hacia arriba, el otro la presentará hacia abajo, y viceversa.

Habida cuenta de que un fotón no puede estar simultáneamente caracterizado por ambas polarizaciones, circular y lineal, la reflexión sobre lo anterior nos hace descubrir la paradoja escondida en el experimento imaginario: puesto que el fotón que entra en el polarímetro 2 unas veces tiene polarización circular y otras lineal cuando sólo se ha medido la polarización del otro fotón y los dos entran en los polarímetros en el mismo instante, no puede haber relación causal entre los resultados de las dos mediciones. ¿Cómo puede la polarización de un fotón, circular o lineal, quedar determinada instantáneamente por el tipo de polarímetro con el que efectuamos la medida sobre el otro fotón?

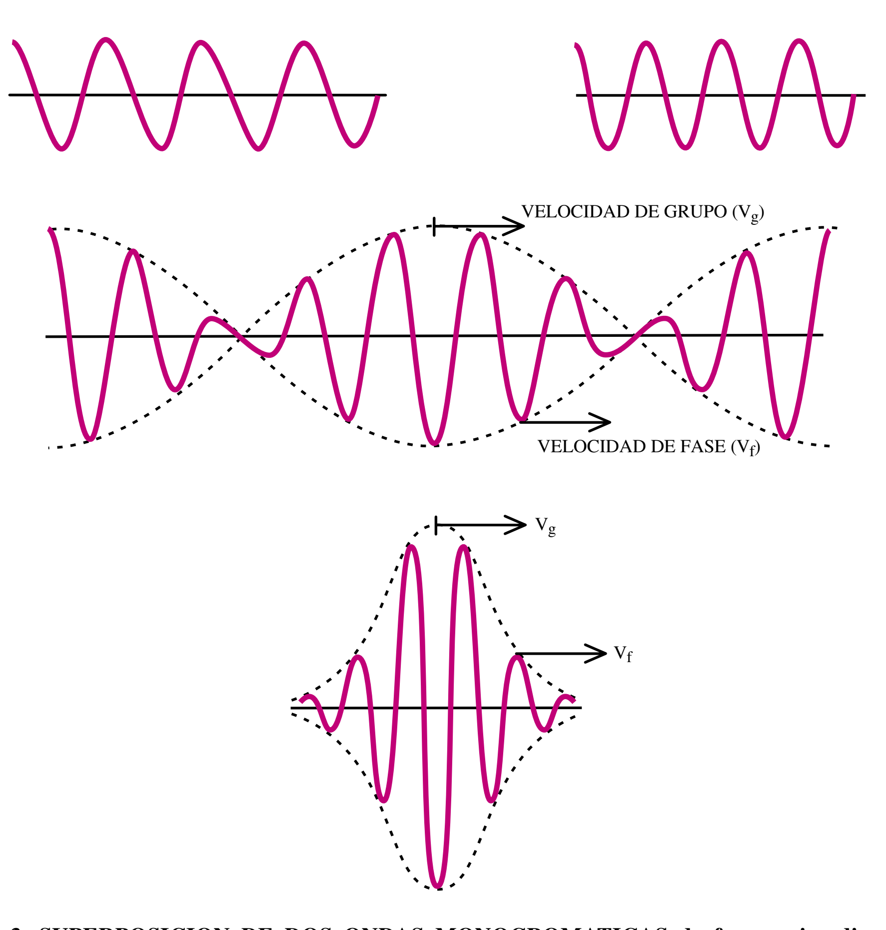
Para no desviarnos del tema, aceptemos que la paradoja no obliga a modificar la mecánica cuántica. Será preciso entonces cambiar nuestra forma común de entender la localidad y admitir la no separabilidad de las descripciones de uno y otro fotón. Pero se nos plantea un problema más espinoso, relativo a la información obtenida del sistema. ¿Permite transmitir instantáneamente información la determinación instantánea de la clase de polarización de un fotón por el tipo de polarímetro que utilizamos para medir la clase de polarización del otro?

Un símil, aunque algo forzado, nos allanará el terreno. Imaginemos un matrimonio formado por una astronauta que vive en una estación instalada en la Luna y un escritor que vive en la Tierra. La lejanía rompe el matrimonio. Llevado el pleito a los tribunales, el juez dicta sentencia en presencia del escritor. Si la sentencia resuelve que debe anularse el matrimonio, la astronauta es soltera desde ese mismo instante, aunque la notificación, enviada vía láser a la Luna, tarda algo más de un segundo en llegar. Lo mismo, si el juez dicta sentencia de divorcio; la astronauta está divorciada instantáneamente. El compromiso matrimonial puede, pues, dehacerse, por anulación o por divorcio, pero no por ambos simultáneamente. Se da una correlación instantánea entre los estados civiles de los dos ex cónyuges; no hay, sin embargo, señal física instantánea que notifique a la astronauta su soltería o su divorcio; vale decir, no hay una relación de causa a efecto de tipo físico. La velocidad de propagación de la correlación es infinita (instantánea), pero no se refiere a nada que transporte información o energía.

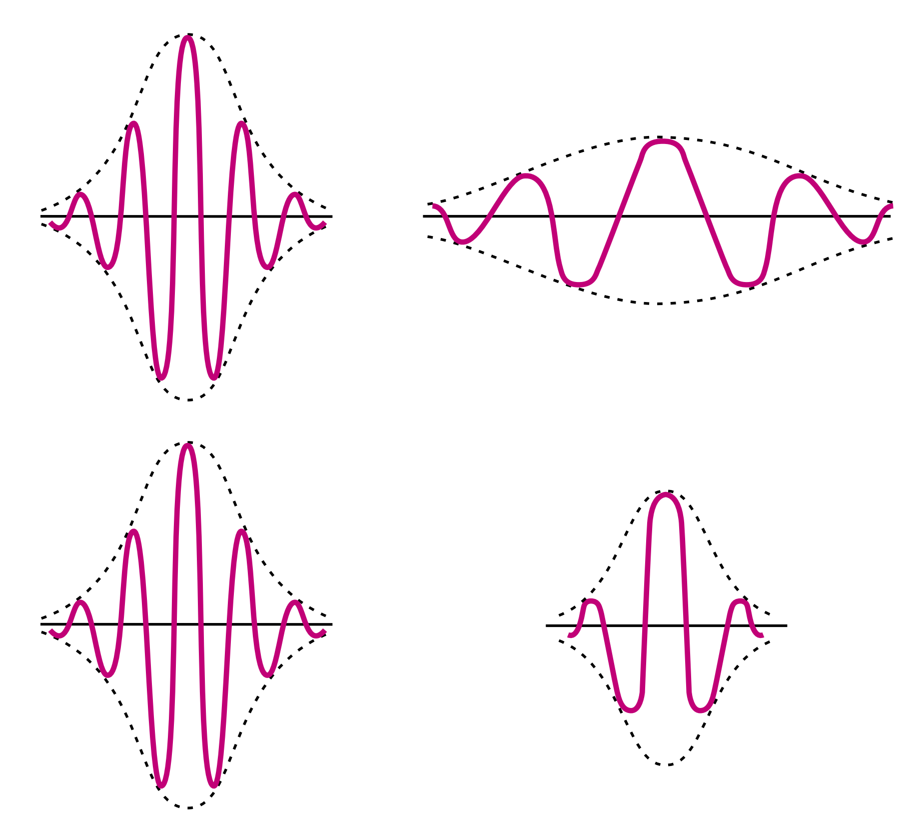
Como en muchas comparaciones, aquí el símil es sólo parcial. El estado del fotón que entra en el polarímetro 2 está correlacionado con la medición que se efectúa en el polarímetro 1, pero no está causado por un agente físico que transporte energía o información del polarímetro 1 al 2. La modificación del estado es instantánea, pero esto no implica una propagación de una señal a velocidad infinita. Por otro lado, la velocidad de verificación de la correlación, enviando una señal, es c.

Propagación y paquetes de ondas

Hasta ahora hemos analizado ejemplos en los que, si bien aparecen velocidades superiores a la de la luz, no corresponden a propagación de partículas o luz. Demos ese paso y ocupémonos de situaciones en las que se analice la propagación de partículas u ondas electromagnéticas en un medio



3. SUPERPOSICION DE DOS ONDAS MONOCROMATICAS de frecuencias diferentes para constituir una sola onda. La frecuencia de la onda de la derecha es mayor (*arriba*). La superposición produce una pulsación (*centro*). El máximo de la pulsación ocurre donde las dos ondas monocromáticas muestran, ambas, crestas o valles. Por tratarse de una interferencia constructiva, las amplitudes de las ondas originarias se suman. La velocidad de propagación de la onda resultante se llama velocidad de grupo (V_g, no sinusoidal); ésta se distingue de la correspondiente a los máximos o mínimos locales, que se desplazan con la velocidad de fase (V_f, sinusoidal). En la parte inferior se representa un paquete de ondas, que por ser de extensión finita contiene en principio todo el espectro de ondas monocromáticas, y las velocidades correspondientes.



4. DEFORMACION del paquete de ondas debida a la dispersión (*arriba*) y a la absorción (*abajo*). La dispersión se debe a que la velocidad de fase en un medio depende de la frecuencia; cada onda monocromática se propaga, pues, con velocidad distinta. La absorción de la onda por el medio va restándole intensidad conforme va propagándose, hasta que termina por desvanecerse. La dispersión y la absorción no son fenómenos independientes.

material. Empecemos por el caso de la radiación de Cherenkov, así llamada en honor de Pavel Cherenkov.

Se produce radiación de Cherenkov cuando una partícula, normalmente un electrón, se desplaza en un medio material transparente a una velocidad superior a la de la luz en dicho medio. En estas circunstancias, el electrón transforma una pequeña parte de la energía que pierde, por su interacción con el medio, en radiación electromagnética confinada en un cono, de forma similar a lo que ocurre con el sonido cuando un avión vuela por encima de la velocidad del sonido (1 mach, o 1229 kilómetros por hora, en la atmósfera terrestre). Este efecto y su explicación les valió el Nobel en 1958 a Cherenkov, Ilya M. Frank e Igor Y. Tamm.

En la radiación de Cherenkov no hay contradicción con lo que afirma la teoría de la relatividad sobre la velocidad máxima de c. Lo que ocurre es que la velocidad de la luz en el medio material es inferior a la de la luz en el vacío, o, en otras palabras, el índice de refracción (cociente entre la propagación en el vacío y la primera) es mayor que uno. Así, en el vidrio el índice de refracción va de 1,5 a 1,7 cuando la frecuencia de la luz crece desde el color rojo hasta el violeta. Hay, pues, un gran margen para velocidades superiores a la de la luz en el vidrio, pero inferiores a la de la luz en el vacío.

De ello podría alguien extraer la conclusión de la imposibilidad de índices de refracción inferiores a la unidad. Una conclusión errónea. Los rayos X, descubiertos por Wilhelm Röntgen hace cien años, hallazgo por el que se le concedió el primer Nobel de física de la historia en 1901, tienen índice de refracción inferior a 1 y, por tanto, se propagarían en el vidrio con una velocidad ligeramente superior a la de la luz en el vacío. ¿Contradice este resultado lo que defiende la teoría de la relatividad sobre c?

Para resolver esa cuestión debemos analizar con cierto detalle el fenómeno de propagación de una onda electromagnética. Supongamos que queremos utilizar la onda para transportar energía o enviar una señal. Empezaremos generándola en un instante dado y acabaremos de generarla en un instante posterior, una vez introducida en ella la energía o información deseada. Toda onda electromagnética real tiene este carácter de finitud. Pero una onda estrictamente monocromática (onda armónica), de una sola frecuencia, es necesariamente de extensión infinita, según sabemos por la ecuación diferencial que la describe.

Si superponemos dos ondas monocromáticas de frecuencias diferentes, obtenemos una sola onda, que continúa siendo de extensión infinita aunque ahora está modulada: se ha convertido en una pulsación. El máximo de la pulsación ocurre donde las dos ondas monocromáticas muestran, ambas, crestas o valles. La interferencia es entonces constructiva. El mínimo de la pulsación ocurre donde una onda monocromática tiene una cresta y la otra un valle: interfieren destructivamente. La velocidad de propagación de la onda resultante se llama velocidad de grupo (no sinusoidal); ésta se distingue de la correspondiente a los máximos o mínimos locales, que se desplazan con la velocidad de fase (sinusoidal).

Las ondas de extensión finita que percibimos son en realidad paquetes de ondas, esto es, la superposición de un número infinito de ondas monocromáticas. Por ejemplo, la luz que vemos azul no está formada por una sola frecuencia matemáticamente precisa, sino que constituye siempre un paquete continuo de ondas monocromáticas en el que dominan las frecuencias correspondientes al color azul.

En el vacío todas las ondas electromagnéticas monocromáticas se propagan con la misma velocidad; dicho de otro modo, la velocidad de fase de la onda no depende de la frecuencia. En razón de ello, la velocidad de grupo también coincide con esta velocidad constante, y de hecho cualquier punto de un paquete de ondas se desplaza con la misma velocidad, ya que no se deforma al propagarse. Esta constante es la velocidad de la luz en el vacío.

Medios absorbentes e inversión de población

Si dejamos el vacío y pasamos a un medio material (aire o agua, por ejemplo), aparecerán dos fenómenos nuevos: la dispersión y la absorción. La dispersión (fenómeno en que el índice de refracción disminuye con el crecimiento de la longitud de onda) se debe a que la velocidad de fase en un medio depende de la fre-

cuencia; cada onda monocromática se propaga, pues, con velocidad distinta. Si el medio es el agua, podemos comprobar nítidamente esa dispersión en el arco iris, cuando se produce separación de las componentes de distintos colores de la luz solar por las gotas de lluvia. Esta separación, o dispersión, provoca que el paquete de ondas se ensanche y deforme a lo largo de la propagación. La velocidad de grupo depende de cómo varía la velocidad de fase con la frecuencia y de las características del paquete, o sea, del peso que tiene cada frecuencia en el paquete. La absorción de la onda por el medio va restándole intensidad conforme va propagándose, hasta que termina por desvanecerse. La dispersión y la absorción no son fenómenos independientes.

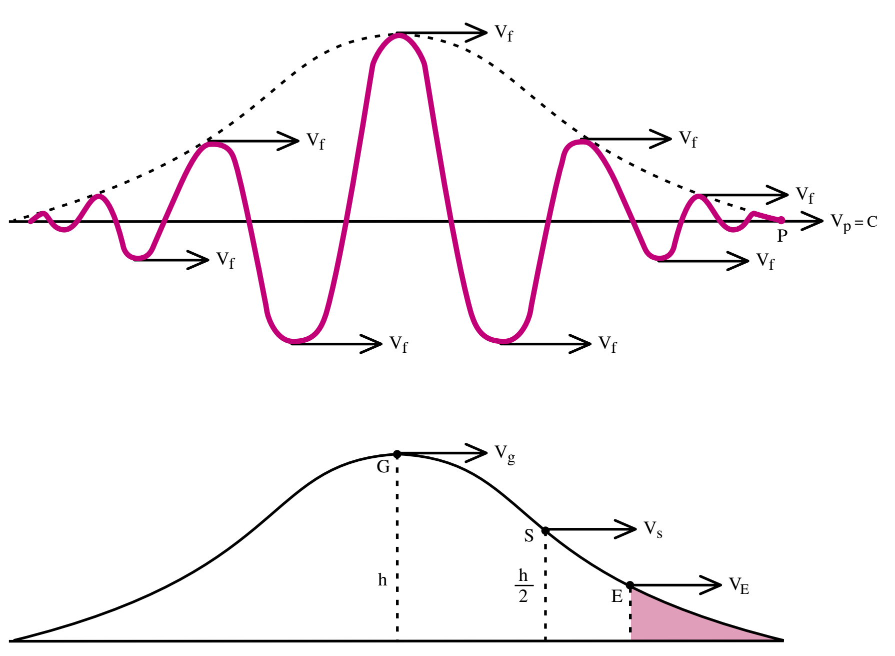
Para abordar la complejidad de la propagación de un paquete de ondas en un medio absorbente, Arnold Sommerfeld y Léon Brillouin introdujeron tres nuevas velocidades: la de transporte de energía, la de la señal o transporte de información y la de los precursores o del frente. La velocidad de transporte de energía corresponde a la que desarrolla un punto que tiene delante de él una fracción fija del paquete. La velocidad de la señal es la del punto que se encuentra a la mitad de la altura del máximo del paquete; por último, la velocidad de los precursores es la del frente más avanzado del paquete.

Cuando el medio es sólo ligeramente absorbente para las frecuencias dominantes del paquete, las velocidades de grupo, de transporte de energía y de la señal vienen a coincidir. Su valor es inferior a la velocidad de la luz en el vacío, con independencia de que la velocidad de fase correspondiente a las frecuencias dominantes sea mayor o menor que la de la luz en el vacío. La velocidad de propagación que se mide experimentalmente es esta velocidad común, la del grupo, energía o señal; dicha velocidad no contradice la teoría de la relatividad.

La velocidad de los precursores, que como acabamos de afirmar corresponde al frente más avanzado de la onda, lugar donde la amplitud se desvanece, escapa pues a toda posibilidad de medición; no hay aparato que pueda lograrlo con suficiente precisión. Esta velocidad es siempre la velocidad de la luz en el vacío: el frente del paquete viene dominado por las frecuencias más altas, para las que la velocidad de fase es *c*, ya que todo medio a altísimas frecuencias se hace transparente asemejándose al vacío.

En cualquier medio material, sin embargo, existen ciertas frecuencias, llamadas de resonancia, para las que la absorción es muy importante. (En la frecuencia de resonancia una determinada excitación sinusoidal produce la amplitud máxima de oscilación del medio.) Cuando un paquete de ondas está dominado por frecuencias cercanas a las de resonancia se habla de dispersión anómala. Así se la califica porque acontecen varios fenómenos curiosos: la velocidad de grupo se hace superior a la de la luz en el vacío (éste es el caso de los rayos X al propagarse por un vidrio) o incluso negativa, pero la de la señal y la de transporte de energía continúan siendo inferiores a *c* y positivas. Debido a la intensidad de la absorción es difícil efectuar medidas suficientemente precisas de la velocidad de propagación de la luz en estas circunstancias; ocurre un fenómeno similar cuando el paquete de ondas atraviesa una barrera por efecto túnel [*véase* "¿Más veloz que la luz?", por Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1993]. Efectivamente, las velocidades de propagación de los fotones medidas por Chiao y colaboradores, que son las de grupo, resultaron ser aproximadamente $(1{,}7 \pm 0{,}2)\ c$. A pesar de ello, la constancia de la velocidad de los precursores y el hecho de que las velocidades de propagación de la señal y de la energía sean menores que *c* garantizan que nada se propague acausalmente.

Conviene insistir en que la velocidad de propagación del fotón que se mide es superior a *c*. Para entender por qué ello no contradice la relatividad einsteiniana hay que recordar que la mecánica cuántica hace que las consecuencias de la relatividad sean mucho más sutiles que cuando se refieren a una partícula clásica, puntual. La dualidad onda-corpúsculo que caracteriza a la mecánica cuántica proporciona una descripción ondulatoria de la propagación de una partícula que viene representada por un paquete de ondas. Entonces, en un medio fuertemente absorbente, o en una barrera atravesada por la partícula por efecto túnel, se produce una remodelación del paquete por atenuación intensa de su cola, lo que conduce a adelantar su máximo respecto de



5. PARA EXPLICAR la complejidad de la propagación de un paquete de ondas en un medio absorbente, Arnold Sommerfeld y Léon Brillouin introdujeron la velocidad de transporte de energía, la velocidad de la señal o transporte de información y la velocidad de los precursores o del frente. En la parte superior se representa la velocidad de fase y la velocidad del precursor, P, que siempre es igual a *c*. En la parte inferior se representa sobre la línea discontinua de la figura superior la velocidad de grupo, V_g, correspondiente al máximo, G; la velocidad de la señal, V_S, correspondiente al punto de media altura, S; y la velocidad de la energía, V_E, correspondiente al punto E que tiene a su derecha una fracción fija de la onda.

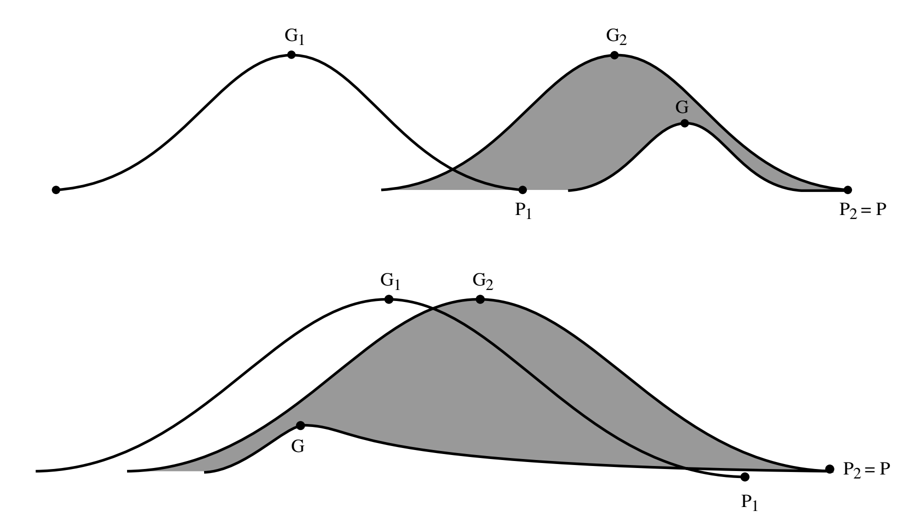
la posición que tendría sin esta atenuación. Resulta así, finalmente, una velocidad de grupo superior a *c*. Lo sorprendente es que, pese a ello, la velocidad de grupo siga siendo la que representa la velocidad de propagación de la partícula.

Cabría preguntar si, al ser la velocidad del máximo del paquete superior a la de los precursores, no los adelantará en algún momento, con lo que se produciría un fenómeno imposible. No hay tal. La absorción de la onda, que ocurre muy rápidamente, no le deja suficiente tiempo al máximo del paquete para ganar esta carrera; cuando alcanza al precursor se desvanece.

El equipo de Chiao afirma haber ahora descubierto circunstancias que conducen a velocidades de transporte de energía y de la señal superiores a *c*, sin por ello poner en un brete la causalidad einsteiniana. Consideran, para su propósito, un medio transparente que no está en equilibrio termodinámico, sino que se caracteriza por presentar lo que se llama inversión de población. En un medio en equilibrio siempre hay menos moléculas en un estado excitado que en el estado fundamental; ahora bien, mediante técnicas introducidas para desarrollar el primer máser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación), podemos mantener el medio en un estado metaestable, en el que haya más moléculas en el estado excitado que en el fundamental. Un medio que presenta esta inversión de la distribución normal de poblaciones energéticas permite también una remodelación del paquete de ondas que lo atraviesa, tal como ocurría con un medio fuertemente absorbente, aunque ahora por razones distintas: por la ganancia temporal y por la posibilidad de tomar prestada energía del medio, que refuerza la parte avanzada del paquete y que se devuelve al medio a costa de la parte posterior del paquete. Ello conduce a velocidades de grupo, energía y señal superiores a *c*. Una vez más, tampoco se viola la causalidad einsteiniana. Veamos por qué.

La metaestabilidad del medio es tal que, al llegar los precursores del paquete de ondas, decae del estado excitado al fundamental, liberando energía de excitación en la parte avanzada del paquete. El medio recupera luego la energía cedida al paquete de la cola del mismo, debilitando a esta región. El resultado final es un avance de todo el paquete, salvo de su punto más avanzado, y una deformación de aquél. El máximo del paquete (velocidad de grupo), el punto de media altura (velocidad de la señal) y el punto correspondiente a tener delante de él una fracción fija del paquete (velocidad de la energía) se hallan todos avanzados, y las tres velocidades superan de ese modo la velocidad de la luz en el vacío.

La verdad es que la energía no se ha propagado más rápidamente que *c*, pues ya estaba en el medio; tampoco la señal, dado que la información estaba contenida en los precursores, que continúan siendo la avanzadilla. Sin embargo, volvemos a enfrentarnos con la paradoja de que, transcurrido cierto tiempo, si todo continuase igual, el paquete debería adelantar a sus precursores. Dificultad que ahora no nos la resuelve la absorción, sino otro fenómeno: cuando el máximo del paquete se acerca a los precursores, el medio no dispone de suficiente tiempo entre la llegada de éstos y el grueso del paquete para reforzarlo en su parte avanzada, y todas las velocidades se reducen a valores no superiores a *c*. Por consiguiente, lo mismo que para el efecto túnel, se trata de un fenómeno transitorio.



6. EL PAQUETE DE ONDAS, con máximo en G_1, se desplaza hacia la derecha. G_2 es su máximo si lo hiciese sin absorción ni dispersión. G es el máximo que realmente tiene en una propagación fuertemente atenuada. En la figura superior la absorción domina en la cola y G está a la derecha de G_2: la velocidad de grupo satisface $V_g > c$. En la figura inferior la absorción domina en la parte avanzada del paquete y G está a la izquierda de G_1: $V_g < 0$. La atenuación no afecta a los precursores, $P_2 = P$. La zona sombreada es la absorbida.

Vacíos modificados

Hasta aquí hemos considerado la velocidad de propagación en el vacío o en medios materiales. Se sabe, desde hace algunos años, que velocidades de grupo superiores a *c* aparecen en medios más tenues. En particular, I. T. Drummond y S. I. Hathrell lo predijeron para un vacío alterado por la presencia de un campo gravitatorio, y K. Scharnhorst para un vacío de Casimir (así llamado en honor de H.B.G. Casimir) sólo alterado por la presencia, lejana, de materiales conductores de la electricidad. A diferencia de otras modificaciones del vacío, pensemos en las alteraciones del mismo en que se encuentra lleno de radiación electromagnética (vacío de nuestro universo, inundado de radiación de fondo) o lleno de campos electrostáticos o magnetostáticos, el vacío gravitatorio y el de Casimir presentan una característica sorprendente; a saber: poseen una densidad de energía inferior a la del vacío normal, es decir, la que no ha sufrido modificación alguna.

De esa propiedad se infiere que el vacío gravitatorio y el de Casimir corresponden a alteraciones que conllevan extraer energía del vacío. Para el vacío gravitatorio ello se debe al carácter atractivo de la gravitación, que hace que la energía potencial gravitatoria sea negativa. Para el vacío de Casimir la explicación es más compleja. Sabemos que, por el principio de incertidumbre de Heisenberg (en honor de Werner Heisenberg), no podemos conocer simultáneamente, en un nivel microscópico, la posición y el momento de una partícula con absoluta precisión; a la misma incertidumbre están sometidos la determinación de la energía y el

tiempo. En razón del principio de incertidumbre no podemos aplicar el principio macroscópico de causalidad al nivel atómico. Pues bien, el principio de energía-tiempo de Heisenberg y la equivalencia energía-masa de Einstein dotan al vacío de una estructura cuántico-relativista que sólo la teoría cuántica de campos permite modelizar adecuadamente.

Para intervalos de tiempo extraordinariamente breves Heisenberg permite violaciones de la ley de conservación de la energía lo suficientemente importantes para que Einstein transforme esta energía sobrante en partículas, desde luego efímeras. Se llega así a una imagen del vacío en que se encuentra poblado por partículas, masivas o sin masa, como los fotones, pero virtuales, ya que desaparecen al mismo ritmo que aparecen, y que, sin alguna acción exterior, nunca pueden observarse como partículas reales.

Ocurre que en el vacío de Casimir no pueden existir ciertos fotones virtuales porque no son compatibles con las condiciones de contorno que deben satisfacer en la superficie de los conductores lejanos. Una consecuencia de este vacío, comprobada experimentalmente y que no deja de sorprender a muchos científicos, es que dos placas metálicas, planas, paralelas y neutras se atraen con una fuerza por unidad de superficie inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia entre las placas. Así pues, el vacío de Casimir corresponde también a una fuerza atractiva, o, lo que reviste mayor significación, a una energía potencial negativa.

Sabemos ahora que esta densidad de energía negativa del vacío gravitatorio y de Casimir dota, a la luz o fotones de baja energía que se propagan por tales vacíos, de una velocidad de grupo superior a la de la luz en el vacío normal. El fenómeno parece así ser similar al de la propagación de ondas electromagnéticas en medios con inversión de población, aunque la modificación de la velocidad es tan pequeña, que difícilmente podrá observarse en un futuro próximo.

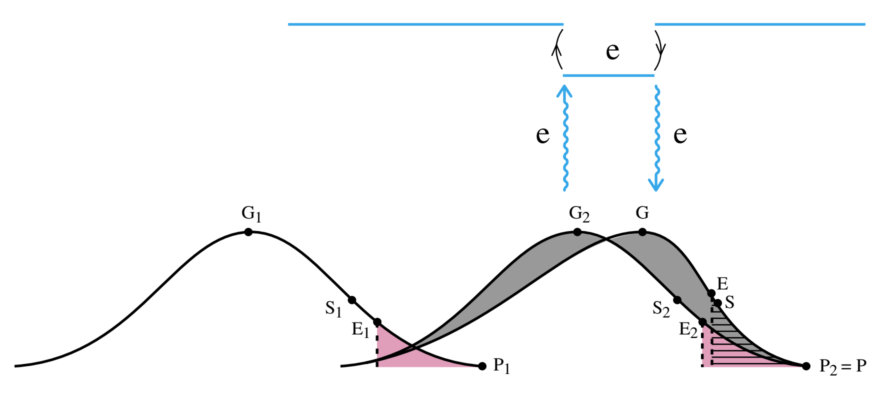
Al igual que un medio con población invertida, el vacío gravitatorio y el de Casimir no están en equilibrio, ya que el carácter atractivo de las correspondientes fuerzas los torna inestables ante fluctuaciones; son, pues, metaestables. Basta observar nuestro universo para ver cómo, por suerte para nosotros, la materia se ha acumulado en forma de estrellas, galaxias y cúmulos buscando el equilibrio. Sólo desde una óptica de macroescala podemos hablar de una distribución uniforme de materia en el universo. La razón de tales agrupaciones se debe a que las distribuciones de masa uniformes no son estables bajo la acción de la atracción gravitatoria.

Si continuamos con la analogía basada en la inestabilidad, llegaremos a la conclusión según la cual las propagaciones de ondas a velocidad superior a la de la luz resultarían también de la deformación del paquete de ondas que toma prestada por un breve instante energía del vacío, que éste ofrece debido a su inestabilidad, reforzando su frente avanzado y debilitando su cola.

A primera vista, la modificación de la velocidad de la luz al propagarse en un vacío gravitatorio contradice el principio de equivalencia, sobre el que se sustenta la relatividad general. De acuerdo con dicho principio, en un sistema de referencia en caída libre, es decir, acelerado por el campo gravitatorio, desaparecen los efectos de la gravitación, la velocidad de la luz es siempre c y la teoría física apropiada para describirlo es la relatividad especial.

Acontece, sin embargo, que la equivalencia relativista es local. Además, en los objetos extensos, aunque caigan libremente, quedan siempre unos efectos residuales de la gravitación, bien conocidos en la Tierra en forma de mareas. (El flujo y reflujo de las mareas corresponden a la deformación de la Tierra: si el planeta cediera a la atracción del Sol, partes distintas del mismo caerían libremente con aceleraciones diferentes.) En la propagación de una partícula o fotón, al comportarse como una onda, abandona una descripción puntual y permite así efectos de marea de origen gravitatorio.

La aparición de velocidades de interés físico superiores a c es transitoria y siempre refleja una descripción no puntual de la partícula o del fotón. La mecánica cuántica, y en particular su descripción ondulatoria de las partículas y los fotones, ha transformado la frase "nada se propaga más rápidamente que la luz en el vacío" en un complejo y sorprendente conjunto de fenómenos que pueden resumirse en otra expresión no menos categórica: "la velocidad de los precursores siempre es c, y, por tanto, nunca se viola la causalidad einsteiniana".



7. UN MEDIO CON INVERSION DE POBLACION refuerza la parte avanzada del paquete de ondas cediéndole una energía ε que luego recupera sustrayéndola de la cola del paquete. Como consecuencia de esta remodelación los puntos G, E y S que determinan las velocidades de grupo, energía y señal se adelantan con respecto a las posiciones que tendrían en ausencia del medio, G_2, E_2 y S_2, por lo que $V_G > c$, $V_E > c$ y $V_S > c$. Las zonas sombreadas representan las modificaciones de la onda debidas a la cesión temporal de la energía ε por parte del medio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WAVE PROPAGATION AND GROUP VELOCITY. L. Brillouin. Academic Press, Nueva York, 1960.

TEORÍA CUÁNTICA Y REALIDAD. Bernard d'Espagnat en *Investigación y Ciencia*, enero de 1980.

REALIDAD DEL MUNDO CUÁNTICO. Abner Shimony en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1988.

SUPERLUMINAL (BUT CAUSAL) PROPAGATION OF WAVE PACKETS IN TRANSPARENT MEDIA WITH INVERTED ATOMIC POPULATION. R. Y. Chiao, en *Physical Review A*, volumen 48, R34, 1993.

SPEED OF LIGHT IN NON-TRIVIAL VACUA. J. I. Latorre, P. Pascual y R. Tarrach, en *Nuclear Physics* volumen B437, 60, 1995.

La obesidad

W. Wayt Gibbs



1. LA BATALLA CONTRA LA BIOLOGIA atraviesa, a menudo, ciclos de pérdida y ganancia de peso. Lucy D. Lustig-Curtis ha conocido ya tres. Engordó en la infancia, después perdió 20 kilos en un campamento de dietas especiales. En la universidad volvió a engordar hasta ponerse en 140 kilos y bajó luego a 90 (*izquierda*). Tras alcanzar la extraordinaria cifra de 320 kilos en 1994, Lustig-Curtis se ha colocado de nuevo en 180 (*derecha*).

Desde siempre, un aspecto orondo se ha considerado signo de salud y prosperidad. O se consideraba. Las cosas han cambiado tanto, que la corpulencia se ha convertido ahora en amenaza creciente para la salud de quienes viven en las naciones más ricas. En algún caso, por ejemplo en los Estados Unidos, más de la mitad de la población adulta cae dentro de la definición actual de obesidad clínica, cifra que introduce la enfermedad en la categoría de epidemia. Según cálculos a la baja realizados por expertos de la Universidad de Harvard, el tratamiento de la obesidad y la diabetes, las enfermedades del corazón, la hipertensión y la litiasis biliar costaron, ya en 1990, 45.800 millones de dólares. A ese monto, correspondiente al último año estudiado, habría que añadir 23.000 millones más debidos al absentismo laboral. Demos más números: ese mismo año, una comisión del Congreso calculó que los estadounidenses habían gastado unos 33.000 millones de dólares en productos adelgazantes, pese a lo cual unos 300.000 ciudadanos dieron prematuramente con sus huesos en la tumba por culpa de comer en exceso y de no hacer ejercicio.

El problema es grave. Las soluciones rápidas y fáciles —dietas líquidas, grupos de apoyo, acupresión, "palillos aromáticos" supresores del apetito e incluso los buenos propósitos de frugalidad y ejercicio— han fracasado en pruebas controladas para reducir el peso de las personas obesas en algo que represente al menos un 10 por ciento durante cinco años; cuantía que resaltamos porque se ha demostrado que tal pérdida aumenta notablemente la esperanza de vida.

El descubrimiento reciente de la leptina, una hormona natural que cura la obesidad cuando se inyecta en ratones mutantes que carecen de ella, avivó la confianza en un pronto arreglo de la situación. Pero el optimismo se disipó al no corroborarse, en estudios posteriores, tales mutantes para la leptina entre los obesos humanos. Pero la identificación de la leptina es sólo uno de los diversos avances registrados en los últimos años, que han escrito un nuevo capítulo en nuestro conocimiento sobre la obesidad.

Armados con las poderosas herramientas del campo de la biología molecular e ingeniería genética, los expertos buscan la explicación fisiológica de aspectos intrigantes de la tendencia a engordar en la sociedad industrializada. ¿Por qué se multiplica la obesidad en los países desarrollados? ¿Por qué hay quienes no adelgazan por muchas dietas a las que se apliquen, mientras que otros se sacian con cuanto les apetece sin poner un solo kilo? ¿Por qué resulta tan difícil perder peso en una cantidad significativa y es casi imposible mantener esa pérdida? Y lo que quizá revista mayor interés: ¿Qué puede hacerse para frenar e invertir esa tendencia creciente? Apoyadas en la idea tradicional de que la obesidad es la consecuencia merecida de la pereza y glotonería, se han aportado respuestas carentes de valor, si no incorrectas. La ciencia puede ya contestar a tales cuestiones con mayor rigor.

Una costosa epidemia de obesidad se va extendiendo por el mundo industrializado. Pero empezamos a conocer ya las raíces biológicas de esta compleja enfermedad, lo que afianza la esperanza de poder prevenir los riesgos que sobre la salud produce el exceso de peso



¿Tendemos hacia la obesidad?

Mucha gente ignora que la obesidad abunda más en Samoa Occidental y en otras islas del Pacífico que en el primer mundo. En Nauru, puntito minúsculo de unos veinte kilómetros cuadrados, que llegó a estar cubierto de guano de aves marinas, sus 7500 pobladores comercian con esa valiosa fuente de fosfatos. De su venta a las compañías de abonos obtienen uno de los ingresos per cápita más altos del mundo. Muchos de estos isleños han abandonado su dieta tradicional de hortalizas y pescado por otra de carnes enlatadas, patatas fritas y cerveza, que importan de Occidente. De donde llegaron también cómodos sillones. En el curso de una generación ya han comenzado a notarse los efectos. En 1987 más del 65 % de los hombres y el 70 % de las mujeres de Nauru eran obesos, y un tercio de la población padecía diabetes.

Muchos países, desarrollados o en vías, caminan en la misma dirección a un paso alarmante. Pero no podemos atribuir esa tendencia sólo a los cambios dietéticos operados. Las encuestas —algunas poco fiables— muestran que la proporción de calorías que los estadounidenses consumen en forma de grasa ha descendido desde los años ochenta en un porcentaje que se corresponde con el crecimiento de la incidencia de la obesidad. Los británicos ingirieron un 10 por ciento menos de calorías en 1991 que en 1980, mientras que se ha doblado el número de pesos pesados. Esa paradoja que se da también en otros países podría tener que ver con el consumo de gasolina y las horas pasadas ante el televisor, que se elevan casi a la par que las cifras de obesos.

Pero la explicación más profunda nos la ofrece la biología evolutiva. En 1962 James V. Neel, de la Universidad de Michigan, propuso que la selección natural presionó a nuestros ancestros a adquirir “genes frugales”, que elevaron la capacidad para almacenar grasa de cada festín y así resistir la próxima hambrina. Pero con la abundancia alimentaria disponible de forma estable, razonaba Neel, tal adaptación se ha convertido en un problema. La teoría encuentra respaldo en lo que está ocurriendo con los pobladores de Nauru. También la avalan los indios Pima, una tribu cuyos progenitores se escindieron en dos grupos durante la Edad Media. Un grupo se asentó en Arizona meridional y el otro buscó asiento en las montañas mexicanas de Sierra Madre. En los años setenta de nuestro siglo, los indios de Arizona hubieron de abandonar la agricultura. Adoptaron las dietas típicas de su entorno, en las que 40 por ciento de las calorías se encuentran en forma de grasa. Veinte años después, estos indios registran la incidencia más alta de obesidad del mundo —superando en mucho la de sus vecinos de raza blanca. Alrededor de la mitad de ellos presentan diabetes cuando cumplen los 35 años.

Eric Ravussin, del norteamericano Instituto Nacional de Diabetes y Enfermedades Renales y del Aparato Digestivo (NIDDK), ha comparado a los Pimas de Arizona con sus parientes lejanos en Maycoba, México, que aún viven de los productos de la explotación agraria y ganadera. Aunque ambos grupos comparten la mayoría de los genes, los Pimas de Maycoba pesan por término medio unos 26 kilos menos y son también unos 2,5 centímetros más bajos. No suele ser frecuente entre ellos la diabetes. Los Maycobas comen la mitad de grasa que sus parientes del norte, y pasan más de 40 horas a la semana ocupados en trabajos físicos. La persistencia de un peso menor de los Pimas mexicanos constituye una razón poderosa para rechazar la hipótesis que funda la elevada incidencia de la obesidad de los Pimas estadounidenses en un defecto genético. Se trataría, por contra, de una susceptibilidad genética (presencia de unos genes frugales de gran capacidad almacenadora) que operaría en un ambiente que ofrece un acceso fácil a alimentos de alto contenido energético, donde tampoco se exige un trabajo duro.

Puesto que todas las poblaciones humanas parecen compartir esta susceptibilidad genética en grado diverso, “vamos a continuar viendo un aumento de la obesidad en los próximos 25 años”, paralela a la elevación del nivel de vida, predice F. Xavier Pi-Sunyer, director del centro de investigación sobre obesidad en el Hospital St. Luke’s-Roosevelt de la ciudad de Nueva York. Y advierte: “ciertos países retrasados están abocados a un riesgo mayor. Las proyecciones para el año 2025 indican que más del 20

Escala de obesidad

La obesidad parece estar en alza en los países más industrializados, aunque las comparaciones son engañosas porque los epidemiólogos no han establecido todavía patrones normalizados para medir este trastorno. Suelen fundarse en el índice de masa corporal (IMC), guarismo que guarda una buena correlación con la grasa corporal. Lo que no ha impedido que incluso en los estudios en los que se maneja este índice se emplee una gama amplia de valores del IMC, desde por debajo de 27 a más de 30, para calificar la obesidad.

La Organización Mundial de la Salud considera tres niveles de obesidad. Los sujetos con mayor riesgo son los que presentan un IMC de 30 o superior. Los médicos suelen emplear tablas de "peso ideal" que preparan las compañías de seguros. Los estudios sobre mortalidad, como el que acaba de publicar la Universidad de Harvard, en el que se recogen los datos del seguimiento de 115.195 enfermeras durante 16 años, demuestran que las tablas estándar minusvaloran los riesgos del exceso de peso, en buena medida porque no toman en cuenta el hecho de ser o no fumador. Los fumadores tienden a ser delgados aunque con una mala salud. Los riesgos aumentan significativamente al alcanzarse un IMC de 25 o superior. El norteamericano Instituto Nacional de la Salud define el peso óptimo como aquel que da un IMC por debajo de 25, umbral que sobrepasan más de la mitad de los ciudadanos de su país.

Cálculo del Indice de Masa Corporal

$$IMC = \frac{w}{h^2}$$

w es el peso en kilogramos
y h es la altura en metros

por ciento de la población mexicana padecerá diabetes".

Estudios realizados con Pimas, isleños y emigrantes "muestran un fenómeno común a tan diferentes poblaciones: la incidencia de la obesidad viene determinada en buena parte por las condiciones ambientales", sostiene Ravussin. Algunos han propuesto un cambio de esas condiciones gravando los alimentos de alto contenido calórico con un "impuesto graso" especial, o elevando la tarifa del seguro a aquellos que no acudan al gimnasio con la debida frecuencia.

Pero ni las penalizaciones económicas ni las legales van a arrancar el aplauso popular. Además, nadie puede garantizar su eficacia. Por ello los investigadores dirigen su atención hacia los factores en teoría controlables: las variables genéticas y fisiológicas que permiten a unas personas aumentar de peso mientras que otras, en idénticas circunstancias, permanecen esbeltas.

A la caza del gen

Desde hace tiempo, los médicos saben que la tendencia a ganar peso va por familias; se discute, empero, la intensidad de dicha inclinación. El seguimiento de gemelos idénticos que han crecido separados revela que existen factores genéticos que controlan, por sí solos, buena parte del índice de la masa corporal, parámetro de la grasa del organismo que sirve para definir la obesidad. De acuerdo con ciertos estudios, el peso depende de la herencia en la misma razón que la altura viene determinada por la genética: en torno al 80 por ciento. La mayoría de autores, sin embargo, sostiene que la determinación genética representa sólo la mitad del valor real.

Tras el examen de más de 400 gemelos a lo largo de 43 años, expertos del norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH) han llegado a la conclusión de que "los efectos genéticos acumulativos explican, en una cuantía significativa, la evolución de la obesidad a lo largo del tiempo", incluida la barriga que se forma en el meridiano de la vida. A ello hay que agregar que los "efectos ambientales compartidos no intervinieron de un modo significativo" en la ganancia de peso de los gemelos. Este resultado se ve potenciado por cinco estudios que compararon los índices de la masa corporal con la de sus padres adoptivos y biológicos. Todos observaron que el entorno doméstico —alimento en el frigorífico, frecuencia de las comidas, actividades compartidas por la familia— desempeña un papel muy escaso o nulo en la determinación de la obesidad de los niños. Al parecer, sólo diferencias ambientales extremas, como las de las montañas de México y las de las llanuras de Arizona, afectan a la población.

Pero permanecen envueltos en el misterio los genes relacionados con la ingesta, el metabolismo y la actividad física. Algunos biólogos han dado con pistas esperanzadoras. Acaban de identificarse cinco genes culpables del engorde desmesurado de los roedores.

El gen *obese*, clonado por el grupo que encabeza Jeffrey M. Friedman en la Universidad de Rockefeller, especifica los planos de la síntesis de leptina, una hormona producida por las células del tejido adiposo. Los ratones que sufren una mutación en este gen no producen leptina o sintetizan una versión deforme; crecen entonces rápidamente hasta triplicar el peso normal. El gen *diabetes*, clonado el pasado diciembre por un equipo de Millennium Pharmaceuticals en Cambridge, determina un receptor proteínico que responde a la leptina mediante la reducción del apetito y aceleración del metabolismo. Los ratones que nacen con una copia defectuosa de este gen no reciben la señal de la leptina; se muestran también obesos desde su infancia.

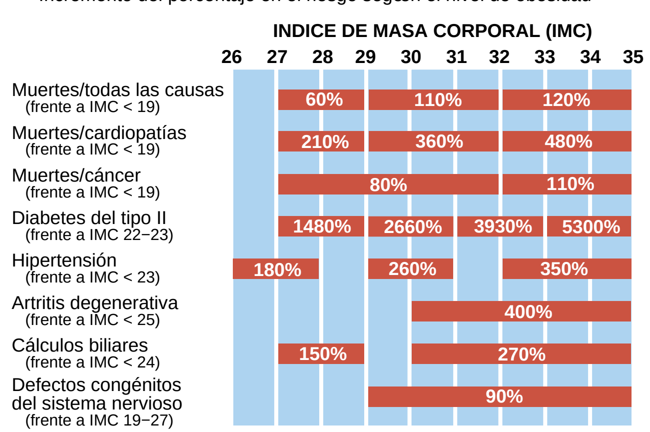
En el intervalo temporal de los últimos doce meses, investigadores del Laboratorio Jackson en Bar Harbor han clonado otros dos genes relacionados con la obesidad: *fat* y *tubby*. Los ratones que portan una mutación en uno u otro van ganando gradualmente peso, de un forma similar a lo que acontece en humanos. El gen *fat* se traduce en una enzima que procesa la insulina, la hormona que da la señal de que el organismo se ha alimentado. Pero la proteína determinada por el gen *tubby* es distinta de las conocidas hasta ahora. Se ignora todavía por qué los ratones con errores en *fat*, *tubby* o *agouti yellow*, un quinto gen de la obesidad descubierto hace varios años, ponen unos cuantos gramos de más.

Aunque los genetistas han localizado versiones de esos cinco genes en el ADN humano, "hasta la fecha, por mucho que hemos buscado mutaciones en estos genes, no las hemos encontrado", confiesa L. Arthur Campfield, de Hoffmann-La Roche, compañía farmacéutica que ha adquirido los derechos del trabajo de Millenium sobre el receptor de la leptina. En efecto, los estudios clínicos de Friedman y otros han demostrado que, a diferencia de los ratones con genes *obese* y *diabetes*, las personas orondas suelen producir una cantidad normal de leptina. A primera vista por lo menos, no se advierte ninguna anomalía en sus sistemas de leptina.

Todo esto no representa sorpresa alguna para la mayoría de los cien-

Una valoración de riesgo

Incremento del porcentaje en el riesgo segœn el nivel de obesidad



FUENTES: New England Journal of Medicine; Annals of Internal Medicine; American Journal of Clinical Nutrition; Journal of the American Medical Association; Circulation

tíficos, que han sostenido desde hace tiempo que deben existir múltiples genes que interaccionen entre sí y con las presiones económica y psicológica para conformar una susceptibilidad del individuo hacia el aumento de peso. Aunque la identificación de agrupaciones de genes relacionados entre sí resulta más complicado que el hallazgo de mutaciones aisladas, algunos laboratorios han conseguido importantes avances trabajando con ratones. David West, del Centro Pennington de Investigaciones Biomédicas en Baton Rouge, ha cruzado una cepa que engorda de manera espectacular con una dieta rica en grasa con otra cepa emparentada cuyos individuos permanecen delgados cuando ingieren un menú semejante. Siguiendo la pista del rasgo que pasa de una generación a la siguiente, West ha demostrado que la sensibilidad a la grasa viene respaldada por varios genes dominantes (de uno a cuatro); ha llegado incluso a precisar los segmentos cromosómicos donde podrían encontrarse. No deja de ser llamativo que el gen *tubby* se aloje en uno de tales segmentos.

Los genes implicados en la regulación del peso en el hombre acabarán encontrándose. Pero eso es sólo la tarea más sencilla. Para combatir la obesidad, habrá que averiguar cómo operan tales genes fuera del laboratorio. Y deberá empezarse por resolver un viejo debate de los dietistas. ¿Existen indicadores, pesos prestablecidos, que condicionen el bienestar del organismo? En la hipótesis de que los hubiera, ¿podrán modificarse?

Preparados para el fracaso

Un adulto occidental suele aumentar unos 10 kilos entre los 25 y 55 años de edad. "Si se supone que un adulto ingiere entre 900.000 y un millón de calorías al año y se calcula el coste energético adicional que representan 10 kilos", comenta Rudolph L. Leibel, de la Universidad de Rockefeller, "se llega a la conclusión de que se almacenan sólo unas escasas décimas del 1 por ciento de las calorías ingeridas. Este grado de control es extraordinario".

Para mantener un peso estable, el organismo dispone de múltiples bucles de retroalimentación, que envían mensajes a través de la sangre y el sistema nervioso autónomo entre el cerebro, el tracto digestivo, músculos y tejido adiposo. No hace todavía mucho, creíase que la grasa era un tejido pasivo con funciones de almacenamiento. La verdad es, reafirma Ronald M. Evans, del Instituto Salk de La Jolla, que "se trata de un tipo de tejido endocrino. El tejido adiposo segrega señales —hormonas como la leptina— y también percibe y responde a las señales procedentes de otras células".

En diciembre del año pasado, Evans dio a conocer el descubrimiento de una nueva hormona,15d-PGJ2, que se produce en el interior de los adipocitos y parece desencadenar la formación de nuevas células, al menos en los niños. Cualquier fármaco que se interponga a la hormona para impedir la formación de nuevos adipocitos funcionaría probablemente sólo en los niños, porque las células adiposas del adulto suelen crecer en talla, no en número. Pero la troglitazona, molécula sintética que imita la acción de 15d-PGJ2, parece ser un fármaco eficaz contra la diabetes de tipo II, asociada con la obesidad, pues indica a las células musculares que deben responder a la insulina.

En sus investigaciones por esclarecer la maraña de vías interconectadas que controlan el apetito a corto plazo





2. EFECTO DEL ENTORNO en la incidencia de la obesidad. Dicha influencia se hace palmaria si comparamos los indios Pima de Arizona (*izquierda*) con sus parientes de México (*derecha*, embadurnados en una de sus celebraciones de Semana Santa). Ambos grupos comparten un fondo genético común. Sin embargo, la incidencia de la obesidad es muy superior entre los indios estadounidenses; ello se debe en parte a su alimentación, muy abundante en grasa, mientras que los Pimas mexicanos basan su dieta en hortalizas y cereales.

Fármacos en proceso de desarrollo para combatir la obesidad

TEJIDO	FARMACO	ACCION	LABORATORIOS	SITUACION
Cerebro	Dexfrefluramina	Aumenta la circulación de serotonina, un neurotransmisor que sacia el apetito	Interneuron con Laboratorios Wyeth-Ayerst	Aprobado por la FDA en abril
	Sibutramina	Eleva los niveles cerebrales de serotonina y noradrenalina; reduce la sensación de hambre	Knoll Pharmaceutical	Sometida a la FDA para su aprobación en agosto de 1995
	Inhibidores del neuropéptido Y	Inactiva el NPY, un estimulador del apetito que también da la señal al organismo para que queme más azúcares y menos grasa	Neurogen, Pfizer, Synaptic Pharmaceutical	Las pruebas de *Fase I comenzaron en marzo
	Bromocriptina	Imita al neurotransmisor dopamina. Administrada en ciertos momentos del día, puede reducir el azúcar de la sangre y la producción de grasa por el hígado	Ergo Science	Están en marcha Pruebas de Fase III en relación con la diabetes. Se prevé su uso en la obesidad
	Leptina	Hormona producida por los adipocitos. El hipotálamo posee receptores específicos para ella. Algunas personas obesas pueden ser insensibles a la leptina; podrían recomendarse inyecciones suplementarias	Amgen	Las pruebas de Fase I comenzaron en mayo
Cerebro, tracto digestivo	Promotores de CCK_A	Aumento de la disponibilidad de ciertos receptores celulares que reducen el apetito cuando se estimulan por la colecistoquinina (CCK), una familia de hormonas y neurotransmisores	Astra Arcus USA; Glaxo Wellcome	Investigación preclínica
	Butabindide	Bloquea una enzima que restaura el apetito al degradar la CCK. En los ratones hambrientos reduce la ingesta de alimento en un 45 por ciento	INSERM (Francia)	Investigación preclínica
Tracto digestivo	Orlistat	Bloquea la lipasa pancreática, una de las enzimas que degradan la grasa, por lo que alrededor de la tercera parte de la grasa de la comida pasa por el tubo digestivo sin digerirse	Hoffmann-La Roche	Se han completado las pruebas de Fase III; se espera que la solicitud de permiso a la FDA esté lista hacia finales de 1996
	Insulinotropina	Versión sintética del péptido-1 una hormona semejante al glucagón, que puede mejorar la obesidad relacionada con la diabetes al retrasar el vaciado del estómago y elevando los niveles de insulina	Novo Nordisk (Dinamarca)	Pruebas de Fase II en marcha
Grasa	Bta-243	Se une al receptor $beta_3$-adrenérgico de los adipocitos, aumentando la cantidad de grasa en sangre que acaba quemándose para producir energía	Laboratorios Wyeth-Ayerst	Investigación preclínica
Grasa, músculo	Troglitazona	Versión sintética de la hormona 15d-PGJ_2, que producen los adipocitos; envía señales a las células del músculo para que quemen grasa en vez de azúcares. Podría ayudar a relajar la resistencia de la insulina en los diabéticos obesos	Parke-Davis; Sankyo	Aprobada en Japón. Pruebas de Fase III a punto de concluirse en EE.UU.; se espera que la solicitud a la FDA esté lista a finales de 1996
El organismo entero	Reguladores de las citoquinas	Cambio de la actividad de las citoquinas, proteínas parecidas a las hormonas, que actúan como mensajeros entre las células	Houghten Pharmaceuticals	Pruebas de Fase II en marcha en lo que respecta a la obesidad relacionada con la diabetes

*Los fármacos han de superar tres tipos de pruebas clínicas antes de conseguir la aprobación de la FDA en los Estados Unidos. En las pruebas de Fase I se estudia la inocuidad del producto, y en las pruebas de Fase II su efectividad, ambas en un número restringido de pacientes. Las pruebas de Fase III deben demostrar que el fármaco es beneficioso para los pacientes y tiene sólo efectos secundarios aceptables cuando se administra a un gran número de individuos.

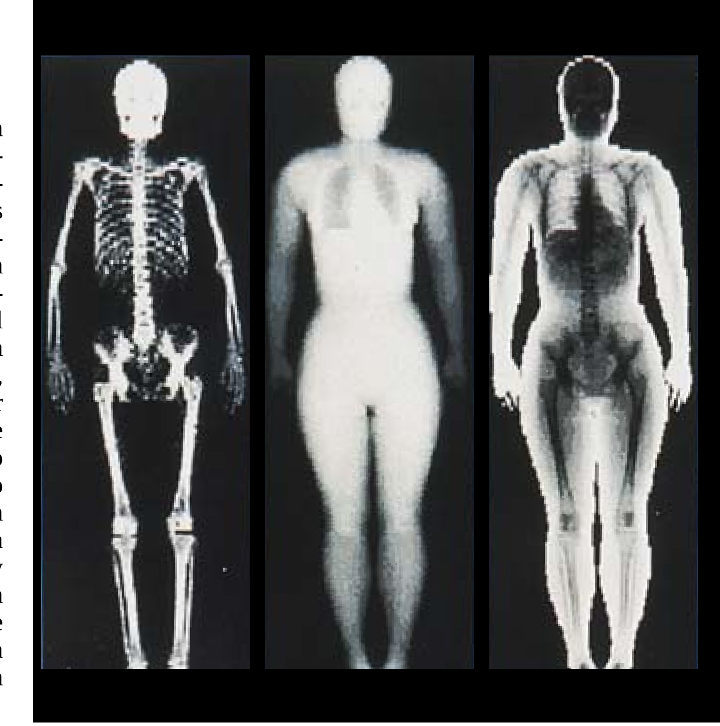
así como los factores que cambian con el transcurso de días o semanas (verbigracia, niveles de grasa y carbohidratos), los expertos comienzan a entrever los mecanismos a través de los cuales estas señales se combinan para mantener constante el peso. Dos son las teorías principales que hoy intentan abrirse paso: la del punto fijo y la del ajuste del punto.

La hipótesis del punto fijo es la más antigua y la más determinista. Afirma que el cerebro ajusta continuamente nuestro metabolismo y manipula subconscientemente nuestro comportamiento para mantener un peso determinado. Aunque el punto fijo puede cambiar con la edad, lo hace de acuerdo con un programa genético prefijado; la dieta o el ejercicio pueden provocar que uno se aparte del punto fijo, al menos durante algún tiempo, pero el objetivo no puede modificarse. Leibel, Michael Rosenbaum y Jules Hirsch, tres adalides de la teoría del punto fijo, terminaron hace un año un trabajo de investigación con el que respaldan su propuesta.

Acogieron a 66 personas en el Hospital Rokefeller. Unos eran obesos y otros nunca habían tenido exceso de peso; todos, sin embargo, habían mantenido el mismo peso durante medio año o más. A lo largo de los tres meses siguientes se les suministró alimentos líquidos exactamente controlados. Los sometieron a diversas de pruebas y los dividieron en dos grupos. Mientras que en un grupo de voluntarios aumentaban el contenido calórico de la dieta, en el otro lo restringían. Cuando los individuos habían ganado el 10 por ciento o perdido el 10 o el 20 por ciento de su peso original, volvieron a someterlos a las mismas pruebas para ver qué es lo que había cambiado.

La investigación arruinó ideas muy arraigadas; por ejemplo, la de que los delgados digieren peor la comida que los obesos. Demostró también la falsedad de otra, la que proclama que uno engordará más todavía —o requerirá menos calorías para mantener su peso de partida— como consecuencia de haber adelgazado y vuelto a ganar peso. Más aún, se comprobó que las personas obesas, cuando su peso es estable, no comen significativamente más que las personas delgadas de musculatura similar aunque con menos grasa.

Pero el propósito real de la investigación era entender qué sucede en el organismo cuando alguien se dispone a cambiar el peso que ha mantenido durante largo tiempo; en otras palabras, por qué los que se someten a dieta tienden a volver al punto de partida. Cuando las personas delgadas y las obesas perdían peso, “se desconectaban, tal parecía, una serie de alarmas metabólicas”, comenta Leibel. El organismo comenzaba a quemar menos calorías, en torno a un 15 por ciento menos que lo que cabía esperar de acuerdo con el nuevo peso. Pero acontecía lo inverso en el caso de la ganancia de peso; incluso los muy obesos han de comer un 15 por ciento más de lo que se esperaría para situarse muy por encima de su punto fijo.



3. IMAGEN NITIDA de la grasa corporal (*derecha*). Se obtuvo mediante la combinación matemática de imágenes tomadas con rayos X de alta energía (*izquierda*) y baja energía (*centro*).

Este hecho pone en serio aprieto la teoría del punto fijo. ¿Cómo justificaría el rápido aumento de la incidencia de la obesidad? “Evidentemente, responde Rosenbaum, los puntos fijos se elevan, lo mismo que crece la talla en cada generación. Pero, que sepamos, los puntos fijos no pueden modificarse en el adulto. Debe, pues, existir una ventana de posibilidad en la infancia, en que el ambiente influya sobre el punto fijo. Si se descubriera cuándo y cómo ocurre eso, podría modificarse el entorno y no habría ya que preocuparse del riesgo de los kilos veinte años después.”

Pero, mientras los defensores del punto fijo no desentrañen los mecanismos centrales a través de los cuales se controla el peso, todo quedará en el terreno de los buenos deseos. La mejor aproximación se la debemos a Louis A. Tartaglia, de Millenium, para quien “el punto fijo del organismo es algo así como un termostato” —un lipostato lo han llamado algunos— en que la leptina hace las funciones de termómetro.

Conforme ganamos peso, razona Friedman, “fabricamos más leptina. Apaga ésta el apetito, aumenta el gasto energético y ejerce otras funciones para restablecer el peso corporal en el punto fijo. A la inversa, si uno adelgaza en demasía, bajan los niveles de leptina, se come más, quema menos y el peso retorna a la situación de la que se había partido. Ahora que sabemos cuál es el gen y cuál su producto, podemos poner a prueba esta sencilla y elemental teoría”.

Amgen, una compañía que ha prometido a la Universidad de Rockefeller hasta 100 millones de dólares por los derechos de fabricación de leptina, ha comenzado los ensayos clínicos de inyección de la hormona en obesos. “De lo que se trata, adelanta Rosenbaum, es de engañar al organismo, haciéndole creer que está más gordo de lo que está en realidad. Es decir, conseguir que colabore y actúe en nuestro beneficio.”

Pero el organismo no se deja engañar tan fácilmente. En mayo pasado, la Universidad de Washington informó que un grupo de expertos había logrado producir ratones que carecen del gen que da lugar al neuropéptido Y (NPY), el estimulador más potente del apetito conocido hasta la fecha. La leptina limita la producción de NPY. Creíase que así se saciaba el hambre. Ahora bien, los ratones que nacen sin NPY no pierden peso. Tiene que haber algo que lo compense.

Los críticos aducen, además, que la hipótesis del punto fijo deja sin explicar las tasas elevadas de obesidad que se observan en los Nauruas y Pimas estadounidenses. Más aún, prosiguen, si la grasa corporal está sujeta a un control central, la cantidad de grasa en la dieta debería tener un escaso impacto sobre el peso. Numerosos estudios abonan lo contrario. Según una encuesta reciente realizada en un universo de 11.600 escoceses, la incidencia de obesidad en aquellos en cuya dieta abunda la grasa triplica la registrada entre quienes el suministro de energía



4. UN RATON MUTANTE (*derecha*) tiene alterado el gen llamado *tubby*. Se han descubierto cuatro más de los que conducen a la obesidad. Este tipo de modelos animales puede contribuir al desarrollo de fármacos para el tratamiento de la obesidad.

depende fundamentalmente de azúcares.

La grasa en equilibrio

Aunque la hipótesis del punto fijo no puede descartarse por completo, otros opinan que la tesis del "ajuste del punto" goza de mayor acreditación biológica. Defiende esta teoría que mantenemos el peso cuando los bucles de retroactivación de nuestro metabolismo, afinados por la susceptibilidad de nuestros genes, se ajustan en un feliz equilibrio con nuestro entorno. Los cambios económicos y culturales están trastocando dicho equilibrio y están arrastrando a la gente —en particular la sujeta a mayores factores de riesgo— hacia la obesidad.

El principal sospechoso de esta tendencia apenas sorprende: es la grasa que chorrea de la hamburguesa, la que suaviza el helado y la que hace posible los fritos más variados. Los bioquímicos se proponen averiguar por qué la grasa es la culpable. Desde hace años sabían que la gente que se alimenta con comidas ricas en grasas consumen casi la misma cantidad que los que ingieren una comida rica en carbohidratos. Como la grasa tiene más calorías por cada bocado, los individuos de amplia papada tienden a ingerir más energía que la que pueden quemar, un fenómeno que se conoce con el nombre de sobreconsumo.

John E. Blundell, de la Universidad de Leeds, atribuye ese sobreconsumo al sistema que controla el hambre y la saciedad; éste responde presto a la proteína y al carbohidrato y con mucha mayor parsimonia a la grasa, con demasiada lentitud para suspender una comida rica en grasas antes de que el organismo haya ingerido más de la cuenta. Los sistemas metabólicos parecen favorecer también a los carbohidratos (que incluyen el azúcar y el almidón). En cuanto hemos terminado el plato de pasta, nuestro cuerpo acelera la combustión de los carbohidratos. Pero si damos buena cuenta de una chuleta de cerdo, apenas crecerá la oxidación de las grasas, señala Jean-Pierre Flatt, de Massachusetts. La mayor parte de la grasa que se ingiere se almacena, para quemarla después en el caso exclusivo de que las reservas de carbohidratos caigan por debajo de cierto umbral, que varía con las personas.

Hay otra formar de avivar el ritmo de combustión de la grasa para obtener energía: empaquetar kilos. Cuanta más grasa existe en el organismo, más ácidos grasos se liberan a la sangre. Ello, a su vez, aumenta la tasa de oxidación de los lípidos, hasta que termina por alcanzarse un "equilibrio graso", en el que toda la grasa que se ingiere se somete a combustión y el peso se estabiliza. Muchos factores genéticos y fisiológicos pueden influir sobre la velocidad de oxidación de las grasas y condicionar, en consecuencia, el ajuste del punto en un entorno particular.

La olestra, una grasa artificial aprobada por la FDA, el organismo que en los Estados Unidos autoriza la comercialización de alimentos y fármacos para el consumo, puede cambiar también el ritmo de la combustión. La olestra, cuyo sabor recuerda bastante el de la grasa, pasa por el intestino sin digerirse. Para George A. Bray, de Pennington, que ha iniciado su estudio, el ingrediente podría cortocircuitar el sobreconsumo. Durante dos semanas, Bray reemplazó por olestra la grasa natural que incorporaba en las comidas de los individuos participantes en el estudio. "No la compensaron ingiriendo más alimento. Aunque está por ver si eso se mantiene en estudios más prolongados."

El equilibrio graso explica en parte por qué el ajuste del punto varía entre personas que ingieren grasas en exceso: unas oxidan bien las grasas con pesos normales; otras las queman sólo en escasa cuantía hasta que los kilos sobrantes provocan un ritmo más vivo de las oxidaciones. Pero el modelo no alcanza a justificar el motivo de que haya personas que no se sobrealimentan bajo ningún concepto. Flatt sale al paso de esa cuestión con su "hipótesis del glucógeno".

El cuerpo humano puede almacenar en forma de glucógeno alrededor del equivalente al suministro de hidratos de carbono de un día. Podemos asimilar el funcionamiento de las reservas de glucógeno al de un tanque de combustible; rellenamos parcialmente los depósitos con cada comida sin que se llegue a alcanzar el tope. El margen entre "vacío" y "lleno" es un asunto de preferencia personal, en cuya conformación intervienen diversos factores: variedad y gustabilidad de la comida, presión social y hábitos alimentarios. La gente que se contenta con niveles bajos de glucógeno o los vacía a menudo mediante ejercicio físico quema mejor la grasa que los que mantienen el tanque a tope, piensa Flatt. Aunque admite que "el nexo crucial entre reservas de glucógeno y apetito sigue sin demostrarse".

Necesitamos muchas más pruebas antes de poder decantarnos por la hipótesis del punto fijo, optar por la del ajuste del punto o rechazar ambas. James O. Hill, de Colorado, ha comenzado un barrido crítico de enorme interés en el estudio de la obesidad: el de la gente que ha perdido mucho peso y ha persistido así durante años. Tras haber identificado ya un millar de sujetos con tales condiciones, se apresta a rastrear distintas pistas bioquímicas.

Por desgracia, ninguna explicación actual de la regulación del peso deja suficiente margen para el control voluntario. Todos los ciclos metabólicos implicados están sujetos a un control subconsciente. De acuerdo con la teoría del ajuste del punto, la introducción de cambios drásticos en el estilo de vida podría instar que el organismo se acomodara a un nuevo peso. Pero la adopción de cambios radicales resultan ingratos e impracticables, como corroboran los millones de personas que lo han intentado sin éxito.

Superando lo más difícil

Los expertos en obesidad convergen en la idea de que la ayuda más eficaz que pueden proporcionar a los pacientes será de índole farmacológica. "El tratamiento habitual en los últimos 40 años, centrado en la recomendación de dietas diferentes, no curará la epidemia galopante de obesidad", asegura Barbara C. Hansen, de la Universidad de Maryland.

La investigación de la fisiología de la acumulación de la grasa en el organismo ha puesto sobre la mesa

un conjunto de objetivos posibles de fármacos contra la obesidad y ha atraído la atención de los laboratorios farmacéuticos. El mercado potencial es enorme. A la extensión creciente del fenómeno de la obesidad hay que añadir, según algunos, su carácter permanente. El fármaco ideal tendrá que consumirse indefinidamente. “La obesidad es incurable”, dice Bray. “Es como la hipertensión. Si se deja de tomar la medicación, la presión sanguínea no se mantendrá baja.”

La dexfenfluramina, un supresor del apetito, para el tratamiento de la obesidad se vende ya en 66 países. Este fármaco, aprobado por la FDA en mayo, fue la primera medicina para adelgazar que recibió autorización oficial en los Estados Unidos en 23 años. A Leibel no se le escapan los pros y contras de la farmacología. “Lo mejor que podemos esperar es que surja algo como la insulina para el tratamiento de la diabetes”, dice. La insulina salva al diabético de tipo I. Y prosigue: “Pero después de 15 años pueden aparecer la complicaciones por nuestra incapacidad para imitar perfectamente la biología. Si tenemos suerte, ese es el tipo de problemas con el que nos enfrentaremos en el tratamiento de la obesidad.”

Aunque se desconoce el costo a largo plazo del tratamiento, los beneficios comienzan a perfilarse con nitidez tras los estudios sobre individuos sometidos a gastroplastia, operación que reduce el tamaño del estómago. La intervención ha demostrado su eficacia en Suecia. El seguimiento prolongado de 1150 pacientes obesos que se sometieron a cirugía gástrica reveló que perdían unos 30 kilos en dos años —40 kilos si la resección había sido más extensa—, mientras que los sujetos control que se atenían sólo a una dieta estándar no perdieron peso. Merced a la intervención quirúrgica se curaron más de dos tercios de los que padecían diabetes, en tanto que sólo sanó el 16 % del grupo control. Por operación también se curaron hasta un 43 por ciento de los casos de hipertensión.

La gastroplastia comporta ciertos inconvenientes, además del riesgo que siempre acompaña a cualquier intervención quirúrgica delicada; en particular, se halla expuesta a muchas complicaciones digestivas. El tratamiento farmacológico sería mejor, aunque lo ideal reside en la prevención, como sugiere Hansen en su trabajo con monos rhesus. Hace diez años, inició con su equipo una investigación sobre monos adultos jóvenes, equivalentes en madurez a hombres de 20 años. Hansen ajustó el suministro alimentario de suerte tal, que ni ganasen ni perdiesen peso. “Hemos conseguido un 100 por ciento de éxitos en la prevención de la obesidad y la diabetes de tipo II”, afirma. “En el grupo control, al que se permitió entera libertad en su alimentación con la misma dieta, la mitad son diabéticos. Como todo lo que sabemos acerca de la obesidad en el hombre es también aplicable a la obesidad en primates no humanos, eso nos demuestra la fuerza del control del peso.”

No enseña, sin embargo, el camino a seguir para alcanzar esa meta. Tampoco las instituciones muestran clara voluntad de paliar la enfermedad. Da la impresión de que se desconoce la magnitud actual del problema y la velocidad con que va a crecer, sobre todo si atendemos a la incidencia creciente de la obesidad de los niños. De aquí a 20 o 30 años, si los adolescentes obesos llegan así a la madurez el problema se agravará en proporciones preocupantes.

En algunos sitios se han tomado medidas provisionales. Así, la intervención en una escuela norteamericana ha permitido obtener cierto éxito, con la disminución consiguiente del porcentaje de niños gordos gracias a la eliminación de las grasas en las comidas, ejercicios más intensos y la implicación de los padres en el control del peso. Verdad es que hay que andar con tiento a la hora de someter a los niños a dietas restrictivas, pero hemos de ser más exigentes y arrancarlos de la pantalla del televisor para que hagan más ejercicio físico. Los padres han de ser los primeros en tomar conciencia del grave problema que se cierne sobre sus hijos. Si no, los economistas deberían comenzar a ajustar sus modelos para prever el ingente gasto sanitario que, por culpa de la obesidad, gravará el futuro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REGULATION OF BODY WEIGHT: BIOLOGICAL AND BEHAVIORAL MECHANISMS. Dirigida por C. Bouchard y G. A. Bray. John Wiley & Sons, 1996.

Información adicional, incluida una extensa bibliografía, está disponible en *Scientific American*, http://www.sciam.com

Ciencia y empresa

IAC

Complejidad de un centro de investigación

Los avances en astrofísica pasan por disponer de la capacidad de observar objetos muy débiles o muy lejanos con la mejor resolución espacial posible. Esta resolución depende del diámetro del espejo primario de los telescopios, además de las técnicas de óptica adaptativa. Las ventajas principales de los telescopios de gran diámetro e innovación técnica residen en la combinación de una capacidad colectora de luz proporcional al cuadrado de su diámetro, con una resolución espacial proporcional a éste: los telescopios de 10 metros de diámetro, en comparación con los hoy existentes de 4 o 5 metros, son 4 veces más eficientes en la recolección de luz. De ahí que un gran telescopio permite una agenda de investigación no sólo más completa y potente, sino también más eficiente; por poner un ejemplo, la observación de objetos muy débiles que requirieran, digamos, 8 horas de observación en telescopios de 4 metros podría hacerse en sólo 15 minutos en telescopios de 10 metros.

Si un gran telescopio es uno de los requisitos para estar en la vanguardia de la astrofísica observacional es lógico que el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) se marcara entre sus objetivos prioritarios disponer de uno. Para ello el IAC ha desarrollado un conjunto de técnicas y métodos propios. Tras un intento frustrado —la propuesta de un gran telescopio en 1989 entre el IAC y el Observatorio Real de Greenwich no prosperó al decidir el Reino Unido incorporarse al proyecto Gemini con Estados Unidos—, el IAC ha conseguido que el 7 de febrero de 1996 su Consejo Rector haya dado el sí definitivo al telescopio óptico-infrarojo de espejo segmentado de 10 metros de diámetro para el Observatorio del Roque de los Muchachos.

La viabilidad en que se basa esta decisión se compone de diferentes estudios específicos en los que se ponderan diversos factores: técnica que aporta el IAC, técnica de que se dispone en España junto con una propuesta de participación industrial española, distintos aspectos de transferencia de técnica involucradas en la construcción y funcionamiento del mismo, así como la concordancia de la construcción del telescopio con los planes de investigación y desarrollo regionales, nacionales y europeos. El estudio declara la viabilidad de que el telescopio puede liderarlo España, y el IAC en particular.

Sin embargo, los telescopios y los instrumentos a ellos acoplados no son más que la fachada externa de un centro de observación astronómico. Detrás de esa fachada existe un liderazgo de dirección. Y existe el peligro de que la atención se centre en esa fachada externa que, por su propia vistosidad y grandiosidad, tienda a minusvalorar no sólo lo que significa el "alumbramiento" de cualquier centro de investigación en España, sino también los delicados problemas de obtención, gestión y desarrollo de recursos físicos, financieros y humanos con los que se enfrenta el fortalecimiento de toda gran instalación científica.

La trayectoria histórica del IAC ha estado orientada por una visión a largo plazo. Esta trayectoria se puede trazar identificando y siguiendo la configuración, desarrollo y fortalecimiento de cuatro dimensiones: investigación, dirección estratégica, acuerdos de colaboración institucional, y administración, supervisión y gestión interna.

Como el examen detallado de cada una de estas dimensiones sobrepasa los límites de este artículo hemos elaborado un infograma que muestra dichas dimensiones junto a sus componentes. El infograma pretende mostrar una imagen sintética de la complejidad del IAC.

¿Se puede comerciar con el cielo? Se podría decir que el IAC nace y se fortalece como una respuesta afirmativa a esa pregunta. En 1856 Charles Pizzi Smyth demostró que los lugares de gran altitud, y en concreto Canarias, ofrecían claras ventajas para la investigación astronómica. Así lo consideró más recientemente el Parlamento español en 1988, aprobando una ley por la cual se protege las condiciones astronómicas de los cielos canarios, de conformidad con lo dispuesto en el Acuerdo de Cooperación Internacional en materia de astrofísica firmado en 1979 entre España y diferentes países europeos. De esta forma, los cielos canarios se convierten en un "parque científico" mundial para la exploración astronómica.

Los primeros pasos del IAC para lograr instrumentación científica están estrechamente vinculados a la "aventura en común" iniciada en 1964 entre Dumont, un científico francés, y Francisco Sánchez, un científico español, bajo el principio de cooperación "tú pones el telescopio, nosotros ponemos el cielo". A partir de aquí se imbrica el acceso e instalación de nueva instrumentación a través de acuerdos internacionales.

La primera tesis de astrofísica realizada en España se defiende en 1969 y la primera cátedra en la universidad española de la misma materia sale a concurso en 1974 en la de La Laguna. El retraso inicial de España en la investigación astronómica, en términos de número de astrónomos, número y ritmo de publicaciones, medios de observación, comienza a mitigarse a partir de la segunda mitad del decenio de los setenta, adquiriendo en la actualidad una situación comparable con otros países del entorno. En la Universidad de La Laguna, en los sesenta, se constituye el primer grupo de investigación en este campo. Un factor decisivo en este desarrollo ha sido la internacionalización de los observatorios del IAC. Han ido consolidándose nuevos grupos de investigación, ha aumentado la infraestructura científica en los observatorios del IAC de acuerdo con los distintos protocolos que regulan el desarrollo de la cooperación internacional, se han realizado cursos posdoctorales con el objetivo de formar investigadores en astrofísica mediante una Escuela Permanente de Posgraduados y se ha institucionalizado la Escuela de Invierno de Astrofísica de las Islas Canarias, considerada como "euroconferencia" por la Unión Europea.

Una vez definida y legitimada la calidad del cielo de Canarias como activo importante para la investigación astrofísica, su plena explotación

requería la instalación de instrumentación e infraestructura de considerable complejidad y coste. Para ello, la fórmula inicial —"tú pones el instrumento, yo el cielo"— establecida con el doctor Dumont se amplía a otras instituciones. Esta fórmula culmina en un acuerdo internacional de cooperación en materia de astrofísica en 1979 entre España, Reino Unido, Suecia y Dinamarca. (Después de rubricarse los convenios entre las instituciones usuarias el 21 de enero de 1979, el Ministerio de Defensa puso reparos a la instalación del Observatorio debido a que en el futuro "Plan de Potenciación de Canarias" preveía la posibilidad de instalar en el Roque de los Muchachos un radar de la defensa aérea.) A dicho acuerdo van adhiriéndose posteriormente otros países europeos (Alemania, Bélgica, Finlandia, Irlanda, Italia, Noruega y Países Bajos), formando hoy un club de doce países.

La cooperación que podrá realizarse al amparo de dicho acuerdo contempla: *a)* intercambio de información sobre la investigación científica en astrofísica, *b)* intercambio de científicos, expertos y personal técnico, *c)* realización común y coordinada de programas de investigación tecnológica, *d)* utilización común y coordinada de instalaciones científicas o técnicas, *e)* instalación y uso de telescopios e instrumentos en los observatorios del IAC. Quizás el botón de muestra más representativo de dicha cooperación sea la regulación de la distribución del tiempo de observación que figura en los protocolos que regulan los aspectos concretos del acuerdo. España dispondrá del 20 % del tiempo de observación de cada telescopio e instrumento instalado en los observatorios y se reserva un 5 % adicional del tiempo de observación para la realización de programas cooperativos entre las instituciones usuarias.

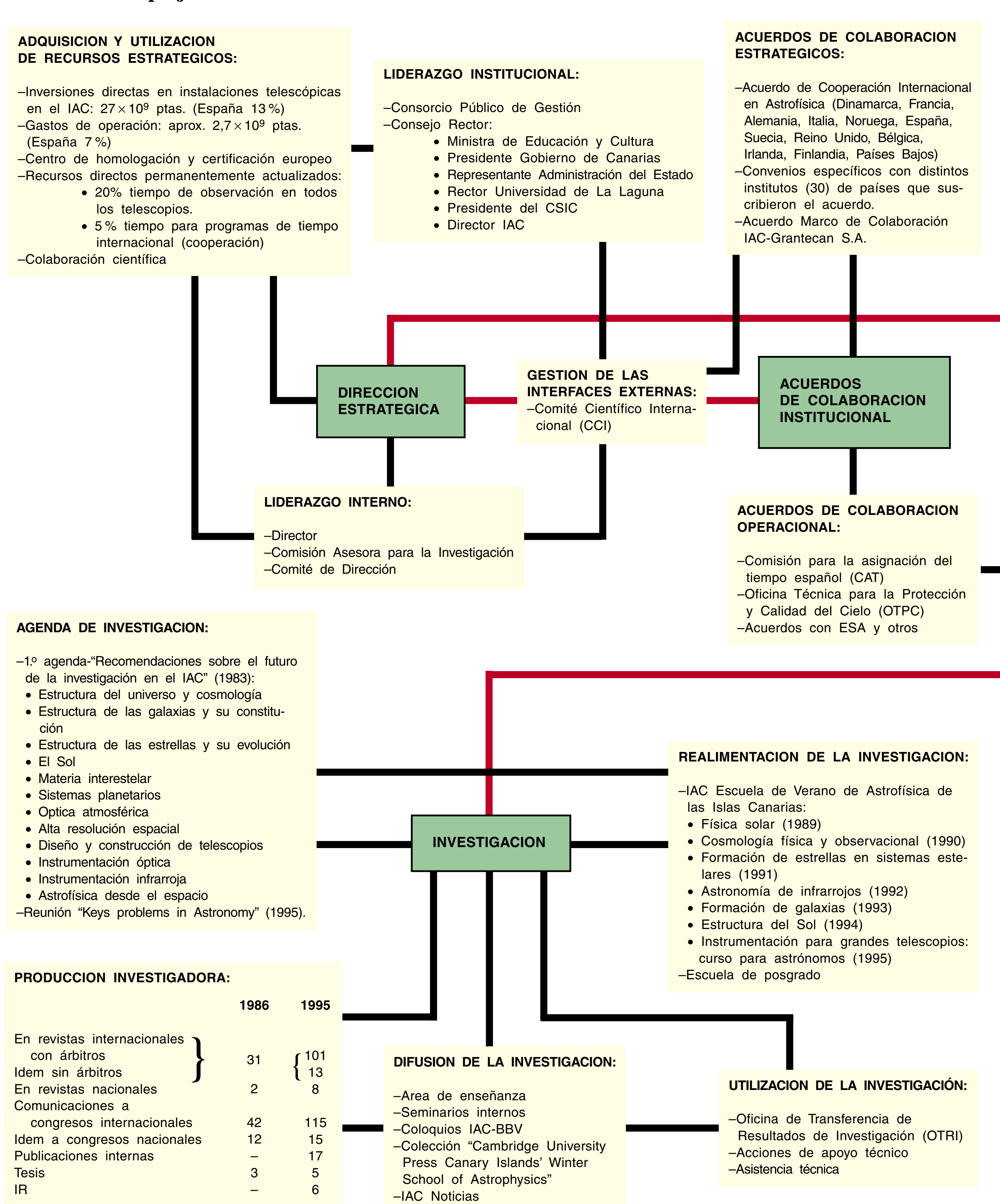
Paralelamente, el embrión jurídico del IAC crece y se desarrolla: Observatorio del Teide (octubre de 1970), Instituto Universitario de Astrofísica (marzo de 1973), Instituto de Astrofísica de Canarias (octubre de 1975). Sin embargo, las figuras jurídicas anteriores (convenio entre entidades patrocinadoras) no eran las más adecuadas tanto para la gestión de los observatorios internacionales como para el desarrollo de otras funciones (palanca eficaz del desarrollo de la investigación astrofísica y la técnica asociada). El Instituto carecía de personalidad jurídica diferenciada. Por esta razón, un informe jurídico del departamento de derecho administrativo de la Universidad de La Laguna propone que se dote al IAC por ley de una nueva personalidad jurídica y plena capacidad de obrar. El modelo jurídico y organizativo finalmente adoptado es el de consorcio público de gestión, cuya finalidad es la investigación astrofísica, integrado por la Administración del Estado, la Comunidad Autónoma de Canarias, la Universidad de La Laguna y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. La forma actual del IAC se inaugura oficialmente en junio de 1985.

La combinación de una calidad de cielo excepcional, investigadores de sólida formación y unos instrumentos adecuados para su explotación suponen la creación de un espacio de colaboración y creatividad con la suficiente "masa crítica" que necesita la gran ciencia. Una muestra de la investigación desarrollada en el IAC se recoge en el folleto conmemorativo del X aniversario oficial del IAC: el estudio del interior del sol a través de las técnicas sismológicas; estabilización de las imágenes solares a través de la construcción de un correlador solar; cartografiado de la nube local solar; diseño y construcción del mayor telescopio enteramente español; desarrollo de un sistema de resolución espacial de imágenes astronómicas en "tiempo real"; desarrollo de instrumentación médica y cartográfica; investigación sobre la estructura de la Vía Láctea; un agujero negro en la constelación del Cisne; el nacimiento de nebulosas planetarias; medidas de litio en las estrellas más antiguas de nuestra galaxia; las enanas marrones y la prueba del litio; los cosmosomas como huellas en la radiación cosmogónica asociadas a las estructuras iniciales de nuestro universo, y participación con instrumentación científica en satélites espaciales.

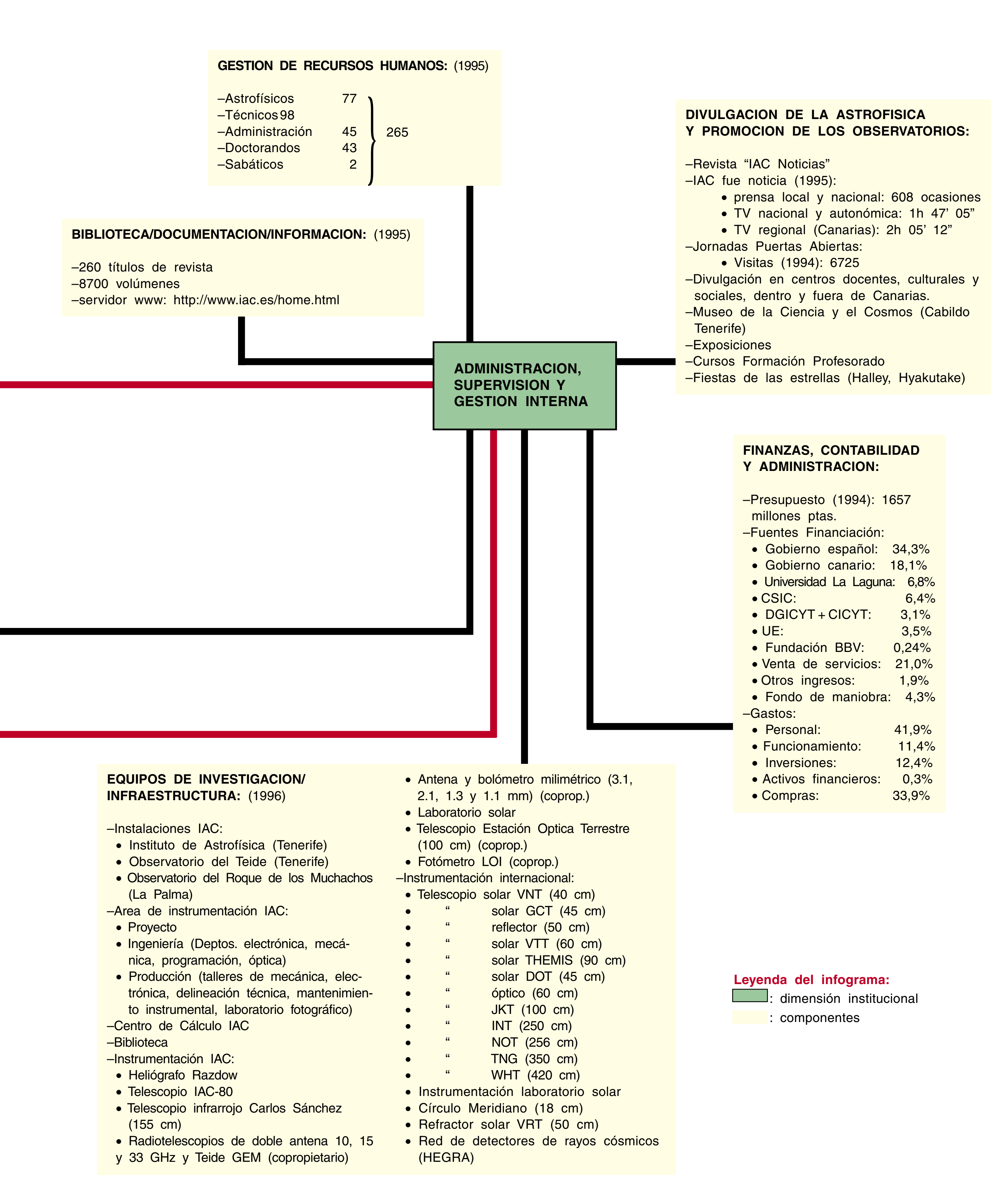
La observación astronómica es una continua fuente de desarrollo técnico. Por eso, todos los centros importantes de astronomía tienen un departamento de instrumentación cuyas funciones principales son el desarrollo, producción y mantenimiento de la instrumentación y procedimientos técnicos. El IAC constituye un centro de técnica avanzada, si bien supeditada a la condición de centro de investigación científica con una política y unas acciones de transferencia técnica y apoyo a sectores científicos e industriales. A su vez, esto ha colocado

Continúa en página 82

Las complejidades de las cuatro dimensiones institucionales del IAC



	1986	1995
En revistas internacionales con árbitros / Idem sin árbitros	31	101 / 13
En revistas nacionales	2	8
Comunicaciones a congresos internacionales	42	115
Idem a congresos nacionales	12	15
Publicaciones internas	–	17
Tesis	3	5
IR	–	6



Fuentes:
(1) Infograma basado en la Fig. 2: The complexities of managing a research institution*, M.N. Kiggundu (1994): “Managing research in developing countries: test of a model”, Public Administration and Development, Vol. 14, 201-222.*
(2) Memorias y diversa documentación del IAC.

al IAC en la situación de poder enfrentarse al Gran Telescopio de Canarias (GTC).

El reto que el IAC tiene ante sí con la construcción y el funcionamiento del GTC implica un cambio de escala. ¿Significará la construcción y el funcionamiento del GTC una desviación excesiva del IAC hacia un centro de alta técnica, más que de investigación científica? ¿Qué consecuencias traerá? ¿Afectarán al actual conjunto de líneas de investigación y sus necesidades instrumentales del IAC las demandas que la construcción y funcionamiento del GTC hagan del mismo? La forma en que el IAC resuelva estas cuestiones marcará su trayectoria futura.

MIGUEL SÁNCHEZ PADRÓN
Y JUAN SÁNCHEZ GARCÍA
Depto. de Economía Aplicada
Universidad de La Laguna

Autopsia ecográfica

Una técnica no invasiva

La autopsia ecográfica o ecoopsia es un procedimiento por el que se obtiene información de todos los órganos. Consiste en hacer ecografías *postmortem* y recoger tomas de los órganos y lesiones mediante una aguja tru-cut o con otra aguja que hemos diseñado en el Hospital Universitario de San Carlos, de Madrid.

Los resultados alcanzados por la ecoopsia concuerdan en más del 80 % de los casos con los obtenidos mediante la autopsia clásica, según demuestra un estudio realizado en el servicio de patología que dirijo en la Universidad Complutense de Madrid. Además, la autopsia ecográfica ofrece informaciones que no puede suministrar la autopsia clásica, como el diámetro de la vena porta, el del conducto cístico, la presencia de calcificaciones puntiformes esplénicas y quistes de bazo y parapiélicos renales.

Conviene saber que hay signos ecográficos *postmortem* que no se dan en vida o que tienen otra significación. Además, los métodos para obtener mejores imágenes en el cadáver difieren de los que se usan en la ecografía *in vivo*. La ecografía puede valorar el volumen y la situación exacta de los derrames y de los órganos y permite obtener, por aspiración o punción, material para su posterior estudio histológico. La precisión en la punción de los órganos asegura el 100 % de los diagnósticos de enfermedades difusas y de las lesiones locales sólidas y quísticas incluso inferiores a 0,5 cm que pueden quedar ocultas en el interior de las secciones de 2 o 3 cm que la autopsia clásica realiza en los órganos.

El rastreo ecográfico se registra en vídeo para su posterior estudio. Usamos un ecógrafo SIEMENS SONOLINE SI-250 con sonda sectorial multifrecuencia de 5 a 7,5 megahertz y otra de 3,5 megahertz.

En el Hospital de San Carlos procedemos como sigue. Ponemos la sonda debajo de la apéndice xifoides, encima de la piel. Nos deslizamos por debajo del reborde costal mientras obtenemos planos ecográficos sagitales, transversales y oblicuos.

De forma reglada recogemos la información en la línea central, medioclavicular y de la axila, con lo que obtenemos imágenes hepáticas y renales. La imagen hepática muestra a menudo una variación en la textura por congestión y hemorragia centrolobulillares o necrosis hepática *postmortem*. Se mide el hígado y se realizan las punciones sistemáticas y de posibles lesiones. Luego, exploramos la vesícula, medimos el conducto cístico y la vena porta. Después, la cortical y el seno renal. Y hacemos punción. Seguimos con las suprarrenales, que son muy visibles cuando están aumentadas de tamaño por tumor o metástasis.

Desde los últimos espacios intercostales visualizamos el diafragma. Por debajo del mismo se distingue el bazo, del que estudiamos tamaño y forma. Hacemos punción. La abundancia de gas en el peritoneo en una autopsia neonatal significa perforación intestinal; en los adultos, sin embargo, el significado es otro, porque los gases suelen ser muy evidentes después de las 10 horas *postmortem*, razón por la cual es preferible hacer la ecoopsia antes. Llegado a la cavidad peritoneal se descubre si hay líquido. En la zona media del epigastrio se ven las asas intestinales relajadas. Por debajo y a la izquierda de ellas, está el páncreas. Es un signo *postmortem* encontrado por M. C. Millana, que sirve de marcador para encontrar este órgano en el cadáver.

En los fetos que han muerto intraútero y sufren maceración, el páncreas es hipoecoico, lo que resulta muy difícil de aislar de otras estructuras adyacentes. Con líquido se ven la forma, el tamaño y la situación del

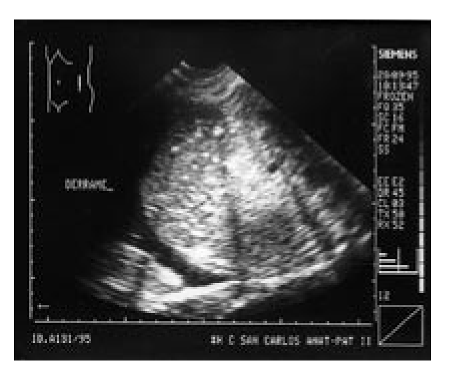
estómago. Varios círculos en línea recta son el intestino delgado e indican normalidad en él y en la raíz del mesenterio. El colon se visualiza con líquido y se comprueba su diámetro.

En el estudio del tubo digestivo es donde hemos obtenido menos precisión hasta ahora, si bien las lesiones difusas suelen aparecer al estudiar las punciones. La vejiga llena permite el estudio de próstata, vesículas seminales y recto en varones; útero, vagina y ovarios, en hembras. En la vejiga fue donde encontré el primer signo ecográfico *postmortem*. Es una zona triangular, hipoecogénica en el área inferior de la vejiga. Se ve siempre y, al pincharla, se levanta una lluvia de finísimas partículas: la razón estriba en que es urotelio descamado. No se ve en vida, excepto en cistitis tuberculosa o tumores. Los vasos sanguíneos, venosos y arteriales, se ven a menudo y suele ser evidente en los niños la entrada al corazón de la cava.

En nuestro rastreo por el pulmón hemos conseguido imágenes distintivas de neumonía y atelectasia. En niños se ve muy bien si el pulmón no ha respirado. Los derrames pleurales, aunque sean muy pequeños, se detectan y se evalúa su cantidad. Su aspiración permite, por estudio citológico ulterior, el diagnóstico. En el corazón se aprecian el tamaño, la entrada de las cavas y la disposición de los tabiques y los derrames.

La glándula tiroides, mamas y testículos son fáciles de ver y punzar. En los niños observamos la columna vertebral y la médula, así como la espina bífida y otras malformaciones osteoarticulares que pasan inadvertidas en la autopsia clásica. La punción de médula nerviosa puede hacerse en neonatos; para observar el sistema nervioso central se pone la sonda encima de las fontanelas y se identifican órbitas, ventrículos cerebrales, cuerpo calloso, caudado, tienda de cerebelo, tálamo y corteza cerebral. En los adultos, un orificio de unos 4 centímetros cuadrados permite estudiar todo lo anterior. Este método ofrece una gran ventaja, si consideramos las dificultades de obtener permiso para extraer el cerebro en la autopsia clásica. En la punción de la médula ósea se consigue un estudio microscópico mejor que en la autopsia clásica por ser un material más reciente.

JULIANA FARIÑA
Hospital Clínico Universitario
San Carlos.
Madrid



1. Ecografía. Las imágenes puntiformes corresponden a calcificaciones entre dos y tres milímetros en el bazo producidas por una tuberculosis miliar. No se descubrió en la autopsia clásica. La imagen oscura de la izquierda corresponde a un derrame pleural



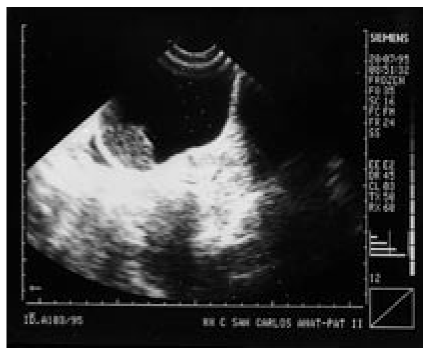
2. Corte longitudinal de la vena cava, en oscuro; el círculo blanquecino corresponde a un corte transversal de la vena porta. El diámetro de este vaso está en relación con la hipertensión portal y por su elasticidad no puede medirse en la autopsia clásica. La aguja de tru-cut atraviesa el hígado y se ve como una línea blanca



3. Asas intestinales centinelas del páncreas (signo de Millana). Por debajo y a la izquierda se encuentra el páncreas en la ecoopsia



4. Dilatación de ventrículos laterales con adelgazamiento de la corteza cerebral. Las dos zonas lineales blancas (hiperecoicas) en disposición oblicua corresponden a los plexos coroideos. Enfermedad de Alzheimer en un adulto de 76 años



5. Vejiga llena de líquido que muestra en el fondo una zona triangular hipoecogénica. Es un signo ecográfico postmortem *que ocurre en todos los cadáveres y corresponde a la descamación de las células uroteliales. Fue el primer signo que encontré y por el que deduje que la ecografía* postmortem *difiere de la ecografía en vida*



6. Corte longitudinal del colon ascendente. La extracción de su contenido demostró que era sangre. La hemorragia intestinal masiva causó la muerte

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Detección de movimientos micrométricos

Hay mucho de qué hablar cuando se abordan los acontecimientos a escala micrométrica (un micrómetro, o micra, es una millonésima de metro, o sea, una milésima de milímetro). Lo que nosotros percibimos como una superficie rígida, contemplada a una distancia de micras sufre una compresión más que apreciable cuando se somete a la leve presión de un dedo. Por otra parte, a esas escalas, los aumentos de temperatura obran sobre los objetos trastornos aún más violentos.

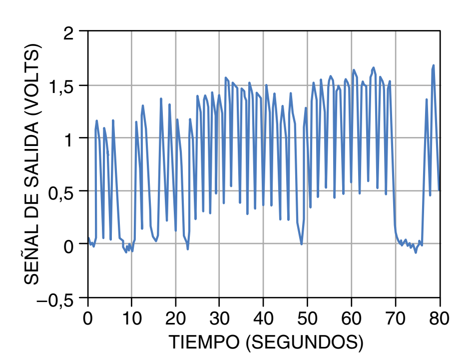
A esos niveles también los procesos biológicos provocan modificaciones en la morfología de los organismos. Por ejemplo, cada latido del vaso contráctil motor de un insecto —su corazón— dobla su abdomen dos o tres micras.

Gracias a los trabajos de John R. B. Lighton, biólogo de la Universidad de Nevada, podemos ahora detectar sin dificultad movimientos tan minúsculos. (Lighton no es sólo un fisiólogo de reputación mundial, sino también un maestro universal de los científicos aficionados, pugnando siempre por encontrar la solución más directa y barata a las dificultades experimentales más fastidiosas.) Advirtió que, detectando las flexiones microscópicas del cuerpo de un insecto, podría aplicar un minúsculo estetoscopio sobre la criatura. Esta técnica permite investigar toda clase de micromovimientos, incluyendo las leves deformaciones de los materiales provocadas por cambios de presión y temperatura ambientales.

Merced al ingenioso método de Lighton los experimentadores pueden emprender un fantástico viaje por el universo microscópico. Ahora, por poco dinero, cualquiera podrá detectar movimientos mínimos, de media micra (es decir, del orden de la longitud de onda de la luz visible).

Lighton capta los micromovimientos valiéndose de diminutos imanes que adhiere a los objetos en movimiento. Luego cuenta con un sensor especial que recoge las variaciones en el campo magnético creado por el desplazamiento del imán.

La sensibilidad del detector de Lighton se funda en la naturaleza dipolar de los imanes: tienen un polo norte en un extremo y un polo sur en el otro. Esos polos se anularían el uno al otro perfectamente si no estuvieran separados por la longitud del propio imán. Debido a dicha autoanulación, la intensidad del campo magnético disminuye muy rápidamente con la distancia. Al triplicar la distancia al imán, el campo se debilita dividiéndose por 27, o sea, según el cubo de la distancia. El tamaño del imán establece la escala mediante la cual cuantificar este amortiguamiento. Cuanto más cercanos se hallen los polos (vale decir, cuanto menor sea el imán), tanto más rápidamente varía el campo con la distancia, lo que, a su vez, produce una señal más fuerte en un cambio de posición, o desplazamiento, del orden de micras.





1. El estetoscopio para insectos se basa en un microcircuito llamado transductor de efecto Hall (HET), que se mantiene como máximo a un centímetro del objeto mediante un brazo de plástico de doce centímetros de largo. El dispositivo registró los "latidos del corazón" de una ninfa de cucaracha (gráfico). *El corazón hizo una pequeña pausa tras la ordenada de 70 segundos porque el experimentador distrajo al insecto agitando la mano*

Conseguir microimanes es fácil. Aconsejo los imanes de los llamados de tierras raras, cuyos prototipos suelen ser unos pequeños discos de unos 0,48 cm de diámetro y unos 0,16 cm de alto. En su superficie, el campo magnético, orientado perpendicularmente al plano del disco, es unas 20.000 veces mayor que el terrestre.

Si para su proyecto esos imanes resultan demasiado grandes, triture uno de ellos con unos alicates. Hechos de una cerámica frágil, se deshacen así en pequeñas esquirlas. Pero tendrá que asegurarse de que conoce la dirección en que apuntan los campos magnéticos de las esquirlas. Con unas pinzas amagnéticas, ponga uno de los fragmentos sobre un trozo de papel parafinado. Al colocar el segundo imán debajo del papel obligará a la esquirla a alinearse con el campo más intenso. Entonces dé un toque de pintura o de epoxia de secado rápido a nuestra partícula magnética. Cuando se haya secado, arránquela del papel. Conviene que el aficionado se haga una decena por lo menos, todas de formas levemente distintas, al objeto de observar cuál es la que funciona mejor en su aplicación.

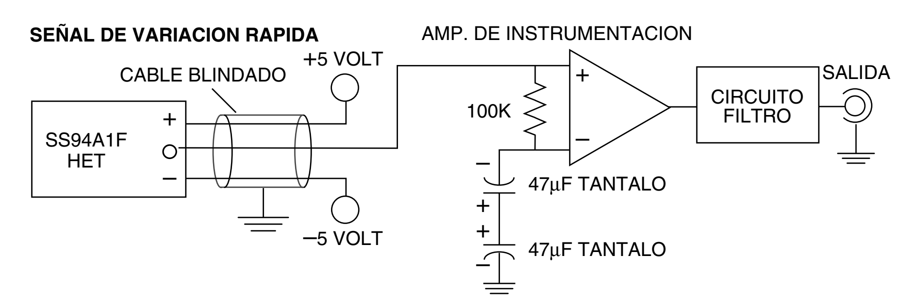
Los tranductores de efecto Hall (HET, "Hall Effect Transducer") perciben las variaciones de un campo magnético. El HET es un milagro de silicio de la era moderna, pequeño, sumamente sensible y fácil de emplear. Lighton nos recomienda el modelo SS94A1F de Honeywell Micro Switch. Este dispositivo da una salida que cambia en 2,5 milivolts por cada variación de un gauss en un campo magnético.

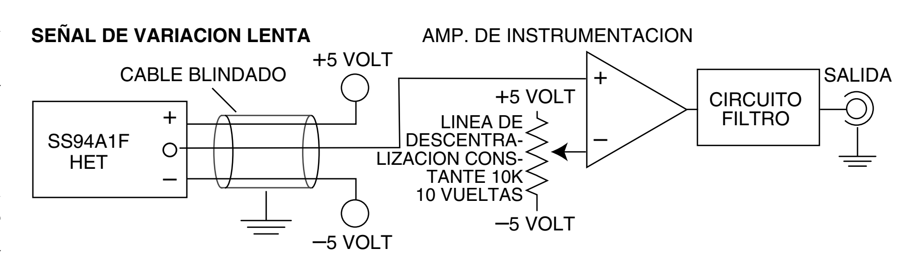
Sujete el HET a no más de un centímetro del objeto. Por ejemplo, si está observando insectos, puede sujetar con epoxia el HET a una pieza de plástico rígido y mantenerlo por encima del objeto mediante un útil para estañosoldar. (Yo empleo uno llamado Helping Hands, que vende Radio Shack.)

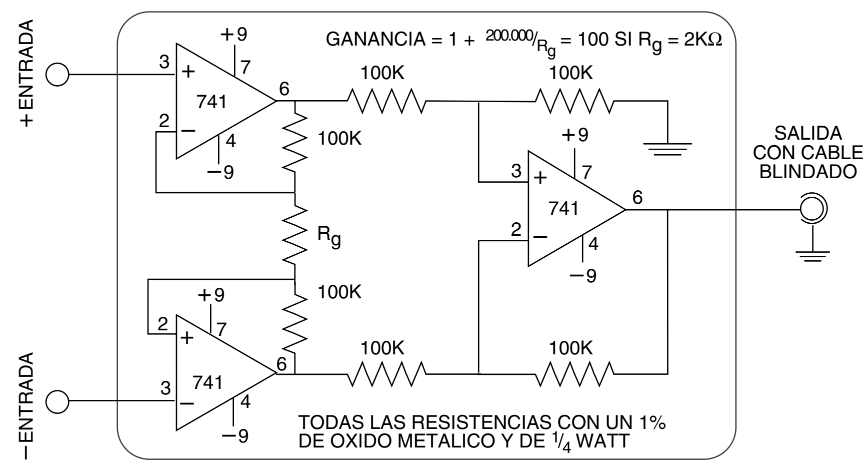
El HET registra todos los campos magnéticos, incluido el terrestre. Esta falta de discriminación significa que el detector producirá siempre una señal constante de tensión eléctrica (debida a la Tierra y al imán). Sobrepuesta a esa tensión constante tendremos la pequeña señal variable causada por el movimiento del imán.

Olvídese de amplificar la señal con un solo amplificador operacional. Uno no puede amplificar con precisión suficiente una señal pequeña sobrepuesta a una tensión eléctrica constante. Se necesita un amplificador de instrumentación. Como los operacionales, los amplificadores de instrumentación se venden en forma de circuitos integrados de poco precio. Pero el aficionado puede también construirse un amplificador instrumental a partir de tres operacionales (*véase la figura 2*).

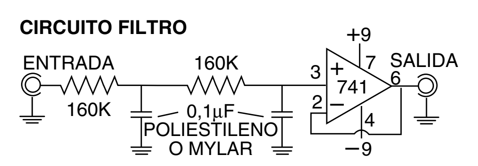
Si nos proponemos estudiar la temperatura u otra señal de variación

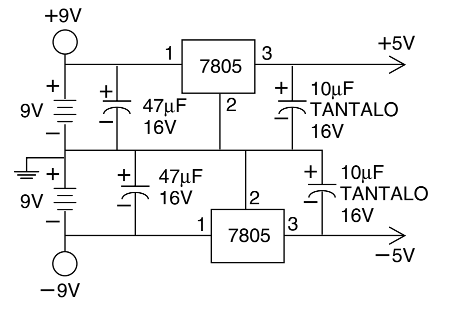






2. La velocidad de movimiento impone los circuitos necesarios. Si la señal sufre muchos cambios a lo largo de unos treinta segundos, hay que elegir el circuito de variación rápida. Para señales más pausadas, emplearemos el circuito de variación lenta. El amplificador de instrumentación puede construirse a partir de tres amplificadores operacionales. El sistema lo completan un circuito filtro y una fuente de alimentación





lenta, emplearemos la versión para señal de variación lenta del circuito de Lighton. En el caso de las flexiones abdominales de insectos y otras actividades que impliquen variaciones significativas a lo largo de 30 segundos, hemos de atenernos al circuito para señales de variación rápida. El circuito se basa en una ingeniosa técnica que debería encontrarse entre los recursos de todo aficionado (y profesional).

El truco empieza dividiendo en dos la señal procedente del HET. Una señal va a la entrada positiva del amplificador. La otra va a un filtro de paso bajo que sólo admite las señales que oscilen por debajo de un ciclo cada treinta segundos. Como el corazón de un insecto se contrae en mucho menos tiempo, el filtro descompone la señal y deja pasar la señal constante grande (la línea de descentramiento constante en corriente continua). Esta tensión eléctrica filtrada se suministra a la entrada negativa del amplificador de instrumentación. Este amplifica la diferencia entre sus dos entradas, con lo que la perturbadora señal de descentramiento se resta automáticamente, quedándonos solamente la señal que deseamos.

Los cables de señal pueden introducir señales extrañas. Actúan como antenas, captando energía electromagnética, tales como emisiones procedentes de líneas de transmisión a 60 ciclos (en Europa, a 50 ciclos), que luego vierten directamente en el amplificador. Para minimizar este efecto, recorte los cables de conexión del HET y el amplificador. Débese, además, emplear cables blindados. Lighton utiliza cables blindados de tres conductores. Estos los podrá encontrar en cualquier almacén de electrónica, aunque se los puede hacer uno. Trence tres cables de colores distintos, uno por cada uno de los cables positivo, negativo y de señal del HET. Envuélvalos con una capa de pan de aluminio y ponga el pan de aluminio a la tierra del circuito a través de un cable corto. Como protección, añada una capa de cinta de fontanería o aislante arrollada sobre el pan. El circuito filtro proporciona otra barrera a los parásitos de las líneas de transmisión. Por último, encierre toda la electrónica dentro de una caja metálica puesta a tierra.

La salida puede leerse con un voltímetro digital; o, mejor aún, empléese un convertidor analógico-digital para registrar los datos en un ordenador. En el mercado hay varios programas para enlazar las señales con su ordenador [véase "Sismología en el patio trasero", Taller y laboratorio, junio]. Para que el HET no detecte esa señal, emplee cable coaxial blindado para la conexión de salida.

Lighton obtuvo unos resultados extraordinarios tras haber encolado un imán de tierras raras entero al abdomen de una ninfa de *Blaberus discoidalis*, un pariente de la cucaracha. Con la ganancia del amplificador de instrumentación ajustada a 100, la señal originada por las contracciones del vaso dorsal (los latidos del corazón del insecto) sorprende e impresiona. A los 70 segundos de iniciarse la grabación de datos, Lighton agitó la mano ante el insecto, cuyo corazón dejó de latir durante varios segundos. Según Lighton, aquello ocurrió porque el sistema nervioso de la ninfa quizá sea incapaz de mantener la circulación y a la vez atender a los estímulos.

Por supuesto, cualquier movimiento del insecto le alterará los resultados; por ello, registre sólo cuando esté quieto. Si se mueve, generará una gran señal de tensión que se sale de la escala. De hecho, Lighton informa que se producen señales intensas siempre que el insecto abre sus espiráculos para respirar, una vez cada cinco a treinta minutos. Disminuyendo la ganancia del amplificador de instrumentación, podrá asimismo observar la respiración del insecto.

La grabación de las funciones vitales de los insectos constituye sólo uno de los experimentos que podemos realizar. Asegurando el imán al pie de un péndulo pesado, podemos construir un sismógrafo muy sensible, capaz de ampliar significativamente por la zona baja el campo de medida de una estación sismográfica de aficionado, como la descrita en el mes de junio.

Conectando el imán a una lámina de mylar tensamente extendida en la boca de un tarro, podríamos registrar la presión atmosférica actuante sobre la membrana. Otras sugerencias aparecen en la página WWW (World Wide Web) de la Society for Amateur Scientists. Les invito a inventar, experimentar y descubrir; y háganme saber lo que averigüen.

Para más información acerca de este proyecto, envíe cinco dólares norteamericanos a la Society for Amateur Scientists, 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o descárguela en http://www.thesphere.com/SAS/ de Internet.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Un poco de oscuridad

Angela se encuentra en una sala cuyas paredes son perfectamente reflectantes. En algún lugar de esta ‘Sala de los espejos’, su amigo Bruno enciende una cerilla. Si mira a su alrededor, ¿podrá Angela ver siempre la cerilla de Bruno, o su reflejo, sea cual fuere la forma de la sala y con independencia de dónde se hallen? O, lo que es igual, ¿llenará por completo la sala la luz de la cerilla, sin dejar de iluminar un solo punto, con independencia de dónde esté situada la cerilla?

El primero en publicar este problema fue Victor Klee, en 1969, pero se cree que sus orígenes se remontan a mucho antes; cuando menos, a Ernst Strauss, en los años cincuenta. Se han planteado diversas variantes. La sala puede ser bidimensional o tridimensional (en cuyo último caso, también el techo y el suelo han de ser de espejo). Puede tener paredes planas —ser, en dos dimensiones, un polígono; en tres, un poliedro— o curvas. Cualquiera que sea la versión escogida, en el modelo matemático estándar del problema, el ojo de Angela y la llamita de Bruno se reemplazan por puntos. Estos dos puntos no pueden hallarse en el contorno de la sala; se supone, además, que son transparentes.

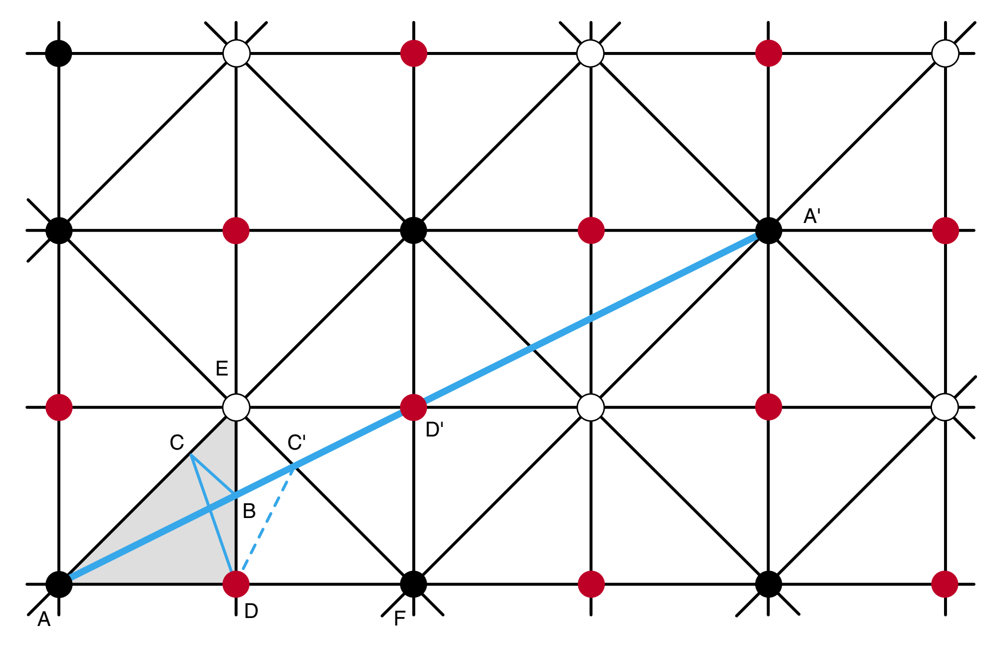
La ley de reflexión en una pared cualquiera es la habitual: “el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión” (véase también la sección del mes pasado, donde nos ocupábamos de las formas de enfilar los cordones en el calzado). Cuando estos ángulos están mal definidos, como ocurre en las aristas o en los vértices, se supone que el rayo luminoso queda absorbido allí y, por tanto, no prosigue.

En el caso de las salas poligonales planas, la solución fue publicada por George W. Tokarsky en la revista *American Mathematical Monthly*, en el número de diciembre de 1995 (volumen 102, n.º 10). La elegante demostración de Tokarsky se vale, muy adecuadamente, de un “truco de simetría” y, como ocurre con las mejores piezas matemáticas, es de sencillez asombrosa.

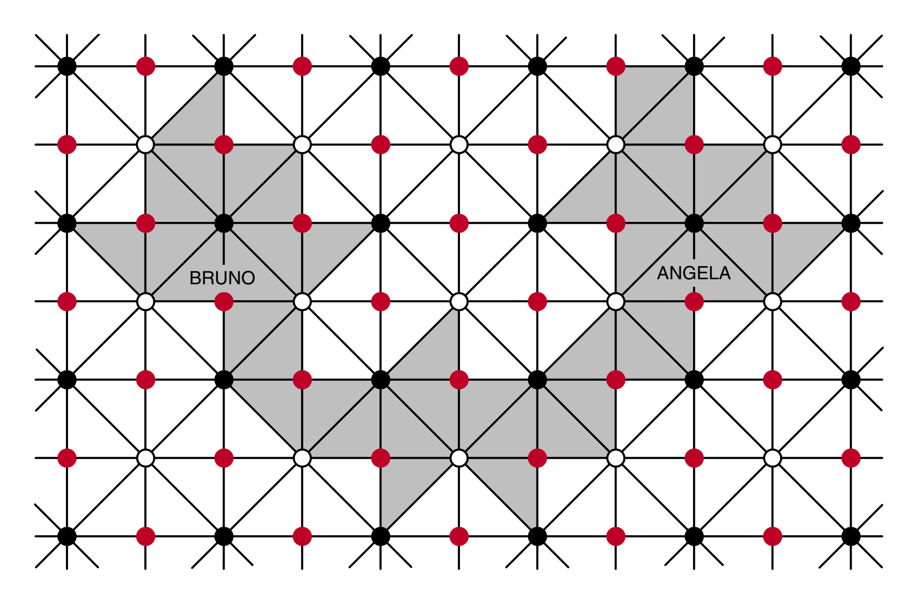
La idea clave consiste en partir de un triángulo rectángulo isósceles, o sea, un cuadrado cortado en dos a lo largo de una diagonal. Tal triángulo, denotado AED (*véase la figura 1*), engendra un retículo regular al reflejarlo repetidamente respecto a cada uno de sus tres lados.

El retículo se utiliza en primer lugar para demostrar un hecho esencial: si se coloca la cerilla en alguno de los vértices de 45 grados de la sala triangular (el rotulado A), ningún rayo de luz emanado de ella podrá jamás retornar a la cerilla. Para comprender por qué, observemos en primer lugar que uno cualquiera de tales rayos, así ABCD, puede desplegarse de la misma manera que el propio triángulo. Por ejemplo, el segmento BCD situado en el interior del triángulo es reflejado respecto a la pared ED, y se convierte en el BC′D del otro lado de la pared. Después, por simetría respecto a EF, C′D se despliega y convierte en C′D′. De este modo, ABCD se despliega y da ABC′D′. Notemos que ABCD termina en D porque se trata de un vértice del triángulo; de manera equivalente, el punto “desplegado” D′ se encuentra en un punto del retículo. La ley de reflexión implica que ABC′D′ es una línea recta, hecho esencial para cuanto sigue.

He coloreado los tres vértices del triángulo, de modo que el vértice A del ángulo de 45 grados es negro, el vértice E es blanco, y el vértice de 90 grados, D, es rojo. También está coloreado cada nodo del retículo, en concordancia con el vértice que cae sobre él al desplegar el triángulo. Mi razonamiento será que, de haber una trayectoria que saliendo de A regresara hasta A, tal camino habría primero de impactar



1. El retículo generado por un triángulo rectángulo isósceles da la clave para comprender la reflexión en el interior de la sala de espejos AED. Un rayo de luz emanado de A que vaya reflejándose por dentro de la sala puede “desplegarse” y convertirse en una línea recta en el retículo. El extremo de esta línea revela la suerte final que correrá el rayo original



2. Esta sala reflectante, construida a partir de un retículo triangular, garantiza que la luz de Bruno no llegue hasta Angela

en un vértice blanco o rojo, donde el rayo se absorbería.

Para demostrar esta afirmación, imaginemos que haya una trayectoria desde A hasta A. Despleguemos esta trayectoria, atendiendo a la regla para desplegar triángulos; tal proceso garantiza que el rayo desplegado sea una línea recta que termina en un punto negro del retículo, A′. Ahora, estos puntos negros distan unos de otros un número par de unidades reticulares, lo mismo en sentido horizontal que en sentido vertical: sus coordenadas son números enteros pares. Así pues, al menos una de las coordenadas del punto medio de AA′ tiene que ser impar, y es, en consecuencia, un vértice rojo o blanco, en el que se absorbe el rayo.

BRUNO
ANGELA

3. Con bloques cuadrados pueden construirse otras salas que le ocultan a Angela la luz de Bruno

Este razonamiento falla, sin embargo, si ambas coordenadas son múltiplos de cuatro. Pero en tal caso, las dos coordenadas del punto medio A″ de AA′ son números pares y A″ constituye, por tanto, un punto negro del retículo, por lo que podemos repetir el razonamiento para A′A″. O bien el punto medio de este segmento es un punto rojo o blanco o también las dos coordenadas de A″ son múltiplos de cuatro. En este último caso podemos reemplazar A″ por el nuevo punto medio A‴, y así sucesivamente. Tras un número finito de sustituciones de ese tenor, hemos de acabar con un segmento que tenga impar una de sus coordenadas. Por ejemplo, si las coordenadas de A′ son 48 en sentido horizontal y 28 en el sentido vertical, las coordenadas de A″ serán (24, 14) y las de A‴ serán (12, 7). El punto medio situado en A‴ es, por consiguiente, un punto rojo o blanco del retículo.

Así pues, el desarrollo de todo camino que una al punto A con un punto negro del retículo tiene que pasar por un punto rojo o por un punto blanco del retículo. Por consiguiente, al replegar nuevamente el camino llegamos a la conclusión de que el camino original toca uno de los otros dos vértices antes de retornar a A.

Podemos construir salas poligonales adosando segmentos horizontales, verticales o diagonales de este retículo triangular (*véase la figura 2*). Supongamos que un rayo de luz se va reflejando por el interior de semejante sala, partiendo de Bruno y terminando en Angela, que se encuentran ambos en puntos negros. Podemos

Acuse de recibo

Hasta la fecha, ha sido la sección del mes de junio, “¿Es equitativo el Monopoly?” la que ha generado el máximo volumen de correspondencia. Muchos lectores hicieron notar que el análisis allí desarrollado pasa por alto muchas características del juego real, en especial, la casilla “Vaya a la cárcel”, así como las de “Caja de comunidad” y “Suerte”. Hubo lectores que presumieron que yo ignoraba las reglas del juego, mientras que otros dedujeron (correctamente) que yo había introducido determinadas hipótesis simplificadoras, aunque no explícitas.

No faltaron quienes facilitaran un análisis más completo de la versión realista del juego. Deseo felicitar en especial a Stephen Abbott, William Butler, Jr., Thomas H. Friddell, Earl A. Paddon y David Weiblen. Es mucho lo que entre todos ellos me han enseñado; tanto, que tengo el propósito de presentar sus resultados, y los de otros que me lleguen, dedicándoles próximamente una sección completa.

En realidad, la casilla “Vaya a la cárcel” genera una distribución de probabilidad sesgada. La “cárcel” es la casilla visitada con más frecuencia, con una probabilidad de 5,89 por ciento, frente al valor “equidistribuido” de 2,5 por ciento (o de 2,44 por ciento si se distingue entre “visitar la cárcel” e “ir a ella”, lo que parece razonable). La casilla de máxima probabilidad siguiente es “Calle Cea Bermúdez”, con una probabilidad de 3,18 por ciento. La casilla visitada con menor frecuencia es el tercer cuadro de “Suerte” contando alrededor desde la “Salida”, con probabilidad de 0,871 por ciento —aparte “Vaya la cárcel”, que en realidad no es visitada, porque ya estás en el trullo. —*I.S.*

después replegar ese rayo con el fin de obtener una senda contenida en un solo triángulo que genera el retículo. Empero, se puede establecer que cualquier camino trazado entre dos puntos negros ha de pasar por un vértice blanco o rojo, por lo que al volver a desplegarlo concluimos que el rayo original tiene que pasar por un punto blanco o rojo. Supongamos que disponemos el cumplimiento de las tres condiciones siguientes:

- Los dos puntos negros representativos de Angela y de Bruno se encuentran en el interior de la sala.
- Ninguno de los puntos rojos o blancos se encuentra en el interior.
- Cada uno de los puntos rojos o blancos situados en el contorno de la sala se encuentra en un vértice.

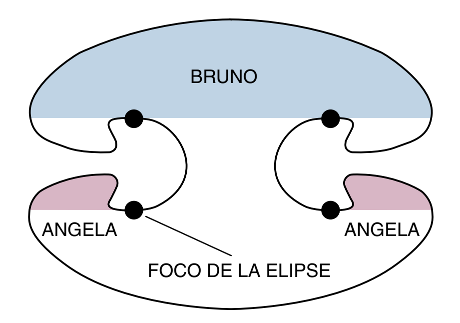
En tal caso, cualquier rayo que impacte en un punto rojo o blanco habrá de hacerlo en un vértice y será absorbido, por lo que no existe en absoluto tal rayo de luz.

El diseño de estas salas requiere cierto ingenio. Por ejemplo, habrá que añadir triángulos extra para introducir en el contorno dobleces adicionales; si no se tiene cuidado, estas torsiones pueden crear puntos reticulares interiores que incumplan la segunda condición.

La sala de la figura está construida a partir de 39 copias de un triángulo rectángulo isósceles; el artículo de Tokarsky presenta otra sala con 29 triángulos componentes. ¿Podrá el lector encontrar esta u otras salas? Tokarsky desarrolla también una teoría parecida para salas obtenidas por despliegue de un cuadrado o de triángulos de otras formas, así como estancias tridimensionales obtenidas a partir de principios similares.

Los ejemplos anteriores hacen ver que en una sala poligonal pueden existir posiciones desde las que una cerilla no llega a iluminar todos los puntos de la estancia. Todo cuanto hemos demostrado, sin embargo, es que existe al menos un punto que no recibe luz. ¿Es posible que exista toda una región de área no nula que no quede iluminada? Este problema es manifiestamente más difícil. Que sepamos, los rayos que parten de Bruno pueden pasar tan cerca de Angela como se quiera: lo único que hemos demostrado es que pueden no hacer impacto en su cabeza.

Al parecer, no se conoce la solución para salas poligonales. Pero Roger Penrose y uno de sus colaboradores demostraron en 1958 que si una sala tiene paredes curvas pueden existir regiones no iluminadas. Recordemos, por ejemplo, que en las elipses tienen dos puntos especiales, los focos; se puede demostrar que cualquier rayo de luz que pase entre los dos focos y se refleje en la curva volverá a atravesar la recta que los une antes de volver a alcanzar la curva. Teniendo presente esta propiedad, se puede comprobar fácilmente que una habitación construida a partir de las dos mitades de una elipse (*véase la figura 4*) tiene regiones no iluminables. Concretamente, los rayos que parten de la región iluminada de azul (Bruno) no podrán jamás penetrar en la región rosa (Angela).



4. Contornos elípticos que definen una sala con regiones donde Angela es inalcanzable por la luz de Bruno

Existen muchos otros problemas similares, resueltos algunos, otros no. Puede verse una selección en *Unsolved Problems in Geometry*, por Hallard T. Croft, Kenneth J. Falconer y Richard K. Guy (Springer-Verlag, 1991) y en *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory*, por Victor Klee y Stan Wagon (Mathematical Association of America, 1991). Por ejemplo, Jeffrey B. Rauch, de la Universidad de Michigan, ha demostrado que existe una cierta sala de perfil curvo, cuyo contorno es liso en todos sus puntos, excepto en uno, que exige una infinidad de puntos de luz para quedar completamente iluminada.

Rauch ha demostrado también que, dado un número cualquiera de cerillas, existe una sala de perfil curvo y liso que no puede iluminarse por ese número cerillas. Y Janos Pach, de la Universidad metropolitana de Nueva York, ha planteado esta cuestión tan elegante: si se enciende una cerilla en un bosque de árboles perfectamente reflectantes, ¿tiene que ser visible la luz desde el exterior? Para mayor sencillez, los árboles pueden considerarse circulares, y el problema, ser planteado en el plano. Nadie conoce la respuesta.

Libros

Ramón Pascual, Luis Alonso y José A. Pereiro

Mecánica cuántica

Fundamentación

The Interpretation of Quantum Mechanics, por Roland Omnès; Princeton University Press; Princeton, 1994

No hace mucho, en el comentario de otro libro en esta misma revista, aludía a los numerosos textos instrumentales de mecánica cuántica (MC). También aludía al actual resurgir de los trabajos sobre la fundamentación de la teoría, en un intento por dilucidar los aspectos más extraños que acompañan a una teoría que, hasta la fecha, no está en contradicción con ningún dato experimental. Este libro pertenece a la última categoría, si bien pretende no ser uno más, sino el fundamental. Ya lo dice el título: no es "una" interpretación de la MC, sino "la" interpretación.

Omnès expone una nueva interpretación basada en la validez generalizada de la MC para cualquier sistema físico, microscópico o no, y en un uso extensivo de reglas lógicas, con lo que la interpretación se parece a la de Copenhague pero está libre de los aspectos oscuros de la interpretación ortodoxa, que podríamos resumir en los relacionados con el colapso o reducción de las funciones de onda y en el establecimiento de una dudosa frontera entre los sistemas cuánticos y los aparatos macroscópicos de medida, que siguen las leyes clásicas.

Tras introducir los conceptos que luego habrá de manejar, como las trayectorias de Feynman y la matriz densidad, aborda los problemas de la teoría de la medida considerando el sistema, el aparato y su interacción mutua y planteando el fenómeno de la "descoherencia" como la causa de que el aparato macroscópico de medida (sometido también a las leyes cuánticas) no muestre fenómenos de interferencia, sino que manifieste un comportamiento clásico. Recordemos que la solución de Bohr consistía en suponer que los aparatos de medida no estaban sometidos a la MC, mientras que otras posibles soluciones son la sustitución de la "incompleta" MC por una teoría con "variables ocultas" o la actuación de alguna mente inteligente, como apuntó von Neumann y apoyó Wigner. Establece después los criterios que debería satisfacer una interpretación, es decir, la coherencia interna ("consistencia") y la completitud.

El cuerpo de la obra está dedicado a los axiomas en los que se basa la nueva interpretación, que se sintetizan en cinco reglas. Las dos primeras establecen el marco de la teoría, el espacio de Hilbert, la dinámica universal, la ecuación de Schrödinger. La tercera regla se refiere al espacio de Hilbert de los sistemas compuestos. La aplicación lógica de estas reglas lleva a definir las propiedades, los estados y las probabilidades. A continuación introduce la idea de las historias y de sus probabilidades, para construir un marco lógico coherente al que, según establece la cuarta regla, deben pertenecer las proposiciones de cualquier descripción de las propiedades de un sistema físico aislado y en el que cabe de manera natural la idea de complementaridad.

Como ejemplos de la teoría construida analiza el caso de las interferencias en el experimento de las rendijas de Young, el movimiento en línea recta de una partícula y la desintegración de un sistema inestable y, a continuación, estudia cómo la aplicación a los sistemas clásicos reproduce sin problema los resultados que el sentido común espera para los sistemas macroscópicos en una especie de teoremas de Ehrenfest generalizados, precisando la frontera entre los comportamientos cuánticos y clásicos.

Mediante estas cuatro reglas ya no es necesario postular un colapso de la función de onda, sino que el efecto de la descoherencia explica la fenomenología. Se trata de un efecto dinámico inevitable, relacionado con la disipación, de eficacia tal que su desarrollo es difícil de observar excepto en aquellos casos en los que no hay disipación, como por ejemplo, los superfluidos, los superconductores y la radiación electromagnética. Pero es totalmente inobservable en los objetos macroscópicos.

La teoría de la medida se analiza bajo la nueva interpretación. Distingue entre "datos", "resultados" y "hechos". La insatisfacción de las respuestas basadas en las propuestas de Everett, de Bohm y de Ghirardi conducen al autor a la quinta y última regla de la teoría y al análisis de la idea de verdad, donde distingue entre propiedades verdaderas y "verosímiles", que pueden formar parte de la historia lógica de un sistema, ya que son consecuencias de un hecho anterior. Son estas propiedades las que permitirán esclarecer la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen y, luego, analizar sistemas macroscópicos no clásicos en los que la ausencia de disipación inhibe la descoherencia y presentan, por tanto, un comportamiento cuántico.

Bajo la luz de la nueva interpretación desentraña los resultados experimentales, que agrupa en tres clases. La primera contiene los experimentos relacionados con el punto de vista de las historias consistentes: la desintegración de una partícula, la medida continua de un átomo en una trampa y el efecto Zenón. La segunda contiene los experimentos de interferencias, incluyendo los de elección retardada, y la tercera los basados en sistemas macroscópicos que se comportan cuánticamente y las observaciones del efecto de descoherencia.

Se trata de un libro importante que debe ser leído por los especialistas en fundamentación y por los filósofos interesados en teorías del conocimiento que sean capaces de seguir algunos razonamientos matemáticos de cierta complejidad. (R. P.)

Filosofía

De la biología

Beyond positivism and relativism, por Larry Laudan. Westview Press; Boulder, 1996. **Naturauffassungen in Philosophie, Wissenschaft, Technik**. Dirigido por Lothar Schäfer y Elisabeth Ströker. Verlag Karl Alber; Friburgo, 1993-96. **A Practical philosophy for the life sciences**, por Wim J. van der Steen. State University of New York Press; Nueva York, 1993.

Conceptual issues in evolutonary biology. Dirigido por Elliott Sober. The MIT Press; Cambridge, 1994. **Concepts, theories, and rationality in the biological sciences.** Dirigido por Gereon Wolters y James G. Lennox. UVK. Universitätsverlag Konstanz-CmbH; Konstanz, 1995. **Concepts and methods in evolutionary biology**, por Robert N. Brandon. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

The metaphysics of science, por Craig Dilworth. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 1996. **Le réductionisme dans les sciences de la vie**. Número monográfico de la *Révue Philosophique de Louvain*, febrero-marzo de 1995.

Entre las filosofías regionales de la ciencia, la filosofía de la biología ha sido la última en despegar. Lo ha hecho con especial fuerza, aunque no ha adquirido todavía un cuerpo coherente de doctrina. Tal provisionalidad obedece a dos razones principales. Una emerge de lo que tiene de biología, disciplina donde resulta difícil hallar reglas de carácter universal. La segunda razón concierne a su dependencia de la filosofía de la ciencia, cuyos fundamentos no terminan de afirmarse. Para entender las dificultades de su desarrollo, según se trasluce en libros recientes, conviene iniciar la andadura por la situación actual de la filosofía de la ciencia, seguir por la filosofía de la naturaleza y recalar en la filosofía de la naturaleza viva. Estaremos preparados para cortar con provecho una buena trilogía omniabarcadora y adentrarnos, por último, en dos capítulos de singular relieve, el relativo a la especie y el del reduccionismo.

Beyond positivism and relativism. Theory, method and evidence recoge 13 ensayos de Larry Laudan en torno a las dos epistemologías que han condicionado el pensamiento contemporáneo. Desde los años sesenta, se dice, la filosofía de la ciencia vive su edad pospositivista. No supone ello la abdicación de las tesis formuladas por Reichenbach, Carnap, Hempel o Popper y quienes con ellos articularon la teoría de la ciencia en los decenios centrales del siglo. Pero el optimismo epistemológico que ésta rezumaba (comparación entre teorías, refutación de hipótesis y existencia de reglas de progreso, con el común denominador de la fe en la objetividad de la ciencia) menguó ante el ataque de los relativistas Kuhn, Feyerabend, el último Wittgenstein, Quine, Goodman, Rorty y otros.

Para los positivistas, las teorías, que son cálculos formales, poseen su propio lenguaje observacional. Podemos pasar de una teoría a otra, de un lenguaje a otro, mediante reglas puente. Popper exigía que los enunciados verdaderos de teorías a sustituir en una ciencia progresiva debían inferirse de las teorías remplazantes. Sin tal derivabilidad sería imposible mostrar que las teorías últimas fueran más falsables que sus predecesoras. Ahora bien, para derivar cualquier teoría A a partir de una teoría B, debemos primero poder formular A en el lenguaje de B o formular ambas teorías A y B en un lenguaje común.

Kuhn y Feyerabend empezaron por negar que hubiera lenguaje observacional neutro, exento de contenido teórico. ¿Se podía entonces traducir una teoría en otra? El “espacio” y el “tiempo” relativistas no encontraban contrapartida en el “lenguaje” de la mecánica clásica. La “inercia” de que hablaba la física galileana difería de la concebida en la física newtoniana. Concluyeron, pues, que no había forma de aseverar o rechazar dentro del lenguaje de un paradigma o teoría global los enunciados de una teoría rival. Quine se sumó a la causa pospositivista con su tesis de la indeterminación de la traducción, aplicación de la teoría clave del relativismo: la determinación incompleta, que asegura que cualquier teoría puede reconciliarse con cualquier batería de pruebas.

Laudan pone sobre el tapete los puntos débiles de una y otra corriente, que, en su opinión, comparten el partir de hipótesis no contrastadas. Alaba la claridad expositiva y búsqueda de coherencia interna de los positivistas, al tiempo que denuncia sus sueños de reformulación axiomática de las teorías científicas. Echa en cara a los relativistas su falta de rigor en la argumentación. La solución que él propone es ortogonal a ambas epistemologías, donde vuelvan a tener cabida la racionalidad y el progreso científico.

La filosofía de la naturaleza saca a la filosofía de la ciencia de su solipsismo y aporta el contenido necesario para las reflexiones sobre conceptos, modelos, leyes y teorías. Qué se entienda por naturaleza a lo largo de la historia constituye el núcleo de la investigación de *Naturauffassungen in Philosophie, Wissenschaft, Technik*.

Dividido en cuatro tomos manejables, *Naturauffassungen* suple la falta de continuidad en el relato con la profundidad de los capítulos desarrollados. Quizá los mejor conseguidos sean los volúmenes primero y cuarto, sobre la Antigüedad y Edad Media y sobre el siglo XX, respectivamente. Se centra el primer volumen en los presocráticos, Platón, Aristóteles, Roger Bacon, Guillermo de Ockham y Johannes Buridanus. Con él asistimos al nacimiento de los conceptos que han conformado el pensamiento occidental en torno a la naturaleza y su explicación: empeiría, doxa, episteme, kosmos, physis, sóxein ta phainomena (salvar las apariencias), etcétera. Vemos los primeros esfuerzos por geometrizar el mundo (Platón) o reducirlo a principios sustantivos (Aristóteles). Y encontramos un texto espléndido de Roger Bacon donde se propone explicar la naturaleza a través del comportamiento de los fenómenos ópticos, que, por pura asociación de ideas, evoca de inmediato el enfoque de la espectroscopía. (Evidentemente, la anécdota no debe sacarse de su contexto.)

Cuando el Renacimiento recupera en bloque los textos clásicos, hace suyas también las diversas concepciones de la naturaleza (mágica, corpuscular, hilemórfica y neopitagórica, con sus mixtos y variantes). La ciencia moderna arroja luz y establece orden con la cuantificación de la inercia y la gravedad. Manipulada en reacciones químicas, sujeta a leyes físicas contrastadas, la naturaleza en el siglo XIX se somete al dominio técnico del hombre, capaz asimismo de apropiársela a su imagen y semejanza, convertirla en sujeto primario de su “Weltanschauung”. Optimismo que se pierde, en nuestra centuria, con la indeterminación cuántica y la relatividad.

Al par que se reflexionaba sobre la naturaleza, se iban conformando los conceptos del segmento vivo de la misma. El propio Aristóteles elabora una filosofía de la biología en el *Tratado del alma*, cuestionada por el mecanicismo cartesiano y la teleología kantiana. Pero lo que hoy se denomina filosofía de la biología tiene un pasado muy corto, el que posee el neodarwinismo. La historia de la filosofía de la biología evolutiva se cuenta de manera sumaria en *A practical philosophy for the life sciences*. Fueron sus iniciadores Marjorie Grene, W. Hennig, Ernst Mayr y David Hull. Generación que se solapa con la siguiente de Michael Ruse, Mary Williams, William Wimsatt y Richard Lewontin, cuyas sombras se proyectan sobre los más jóvenes: Robert N. Brandon, John Beatty,

Richard Burian, Philip Kitcher, Bob Richardson, Alexander Rosenberg o Elliott Sober. Disponen de varios foros de expresión, revistas y colecciones de libros.

Van der Steen ofrece una criba pormenorizada de las obras, y los temas, que han ido marcando el camino. Desde los manuales iniciales de Hull (*Philosophy of biological science*) o Ruse (*The philosophy of biology*) hasta las últimas compilaciones. Indica la gradual expansión de la filosofía de la biología hacia terrenos fronterizos con otras ciencias, como la sociología, la psicología y la ética. Procede de forma sencilla y nítida, preocupado por cumplir una triple misión que se ha propuesto, a saber, mostrar que la filosofía constituye una herramienta útil para las ciencias de la vida, incardinar la ciencia en la filosofía y revelar las limitaciones de una y otra. La mayoría de los capítulos contienen ejemplos y ejercicios que el lector debe resolver; así, la presentación del envejecimiento le lleva a los conceptos de programa genético, determinación genética, prueba y otros de epistemología.

En efecto, van der Steen se ha esforzado por escribir un texto de filosofía más cercano al habitual en ciencias que a los manuales filosóficos al uso. A diferencia de los epistemólogos, que idean teorías y modelos de validez general, los científicos caminan más a ras de suelo; no desechan la generalidad, pero si el modelo que han desarrollado no posee validez universal, anotan las excepciones y lo aplican de una manera mucho más restringida. El autor aborda los modelos filosóficos dentro de ese horizonte científico; reconoce, en consonancia, que la utilidad contrastada de unas explicaciones en determinados contextos puede quedar invalidada por contraejemplos en otros.

Quien busque una reflexión más honda sobre las teorías biológicas habrá de sumergirse en *Conceptual issues in evolutionary biology*, *Concepts, theories, and rationality in the biological sciences* y *Concepts and methods in evolutionary biology*, tres obras de parejo contenido, aunque a veces dispar enfoque. En 1984 apareció la primera edición de *Conceptual isues*, gavilla de trabajos que señalaban las grandes líneas por donde debía discurrir la filosofía de la biología neodarwinista. Esta segunda edición, nueva en más de la mitad, cosecha ya los primeros frutos.

Entre ambas ediciones se celebró el segundo Coloquio interdisciplinar Pittsburgh-Konstanz de filosofía de la ciencia, cuyas ponencias se publican en *Concepts, theories, and rationality in the biological sciences*. Además de abordar las cuestiones clásicas, se pone particular énfasis en los nuevos problemas morales y cognitivos.

Como es uso siempre que entra en juego el neodarwinismo, la ponencia de apertura se le reserva a Mayr. La aprovecha para dibujar su visión particular de la historia de la disciplina y su aportación a la misma. Se atribuye la eliminación del esencialismo con su propuesta del "pensamiento poblacional". Reclama para sí la primogenitura de la noción de especie biológica. Y manifiesta haber sido el primero en defender la autonomía de la biología. Recuerda que la unificación de la ciencia propugnada por el neopositivismo significaba la disolución de la biología en



1. Los teóricos de la biología se han empeñado, a lo largo de la historia, en descubrir leyes o regularidades en la naturaleza viva. Durante el Renacimiento prendió con fuerza la teoría de las signaturas. Según Paracelso (centro) *la pulmonaria* (izquierda) *con sus hojas de manchas blancas, que reflejaba la coloración de las expectoraciones de las enfermedades bronco-pulmonares, constituía un remedio indicado; la nuez* (centro) *que recuerda los hemisferios cerebrales, era buena para los trastornos mentales; la mandrágora estimulaba el apetito venéreo y el cólquico remediaba la gota* (derecha)

la física. Desde la perspectiva del Círculo de Viena, pedir un estatuto epistemológico propio para la biología era aceptar las tesis “metafísicas” de Driesch (y su *Entelechie*) o Bergson (con el *élan vital*).

El núcleo duro de la filosofía de la biología, objeto de *Concepts, theories*... y de *Conceptual issues*, gira en torno a los problemas que brotan del análisis fino del concepto de evolución por selección natural: reproducción y pervivencia del más apto, función y finalidad, adaptación, unidades de selección, especie y clasificación.

Herbert Spencer acuñó la expresión “supervivencia del más adaptado” para describir la teoría de Darwin. Para que pueda darse un proceso de selección los organismos implicados tienen que evidenciar una capacidad distinta para sobrevivir y reproducirse. Pero, según se exponga la tesis, se cae fácilmente en la circularidad. ¿Quiénes sobreviven? Los adaptados. ¿Quiénes son los adaptados? Los que sobreviven. Varios son los esfuerzos ideados para no caer en ese vicio lógico. Los más aplaudidos apelan ahora al carácter probabilístico del concepto de adaptación.

Otro problema exclusivo de la filosofía de la biología es el del finalismo. No hay texto biológico que antes o después no apele a la función, motivo o razón final de un receptor, un órgano, un comportamiento o un proceso: el corazón existe para bombear la sangre, los osos tienen pelaje para protegerse del frío, la propia adaptación es para sobrevivir. Las teorías esbozadas para eliminar de la biología la noción de propósito van desde la mera negación de su existencia, reputándola un falso problema, hasta la reconversión mecanicista de las explicaciones funcionales. Otros toman un camino indirecto para enfrentarse con la cuestión; y así distinguen entre adaptaciones y beneficios fortuitos. Cuando las tortugas marinas salen del océano para la oviposición, emplean sus patas delanteras para cavar los nidos. Las extremidades les son obviamente útiles para cumplir tal misión, pero no es ésa la razón por la que evolucionaron. Las tortugas y sus antepasados contaban con patas delanteras mucho antes de que ningún quelonio saliera del mar. Las extremidades anteriores aportan un beneficio fortuito cuando se emplean para construir nidos.

Parece obvio que las distintas partes de un organismo se fueron seleccionando en provecho de éste, para su conservación. Pero, ¿por qué no generalizar la idea y proponer que los individuos se seleccionaron en pro de la especie? Por otro lado, nada impide plantear la cuestión al revés y suponer que el organismo está determinado en su dotación genética para velar por sus órganos, para garantizar, en última instancia, la supervivencia de los genes que contienen.

Las cuestiones de ese tenor se amparan en filosofía de la biología bajo el epígrafe de unidades de selección. Para unos, la selección natural opera en los individuos; los caracteres se seleccionan en un sujeto determinado. Darwin, patrocinador de esa tesis, reconoció dos excepciones: las castas estériles de los insectos sociales y la moral del hombre; en ambos casos la evolución del rasgo buscaba el beneficio directo del grupo, no del individuo. R. A. Fischer añadió el sexo entre los caracteres seleccionados para bien del grupo; su función sería la de crear diversidad genética en la especie y posibilitar la adaptación consiguiente ante los avatares o cambios bruscos del entorno.

La tesis de la selección de grupo ganó adeptos hasta mediados de los años sesenta cuando apareció *Adaptation and natural selection* de George C. Williams. Para Williams, la unidad real de selección no era el grupo, ni siquiera el individuo, sino el gen. Así nació la idea de selección natural que Richard Dawkins popularizó más tarde en *El gen egoísta*. La tesis que ahora empieza a abrirse paso es, sin embargo, más sincrética; la selección opera en genes egoístas, en organismos y en grupos bien adaptados. Algunos, entre ellos R. J. P. Williams, abogan incluso por la selección natural de los elementos químicos.

De entre todas las ideas clave de la filosofía de la biología la especie es la que ha merecido mayor atención, antes y después de la revolución darwinista. Concepto a caballo antaño entre la biología, la metafísica y la lógica, se le obligó, en los años setenta y ochenta, a despojarse de todo resabio esencialista. Su interés lógico parecía resistir resguardado entre las clases naturales, de donde han intentado sacarla David Hull y sus epígonos protestando que las especies son individuos.

Otros filósofos de la biología, sin embargo, se mantienen más cautos. Conocen el arraigo de las clases naturales en las explicaciones, por ejemplo, de la tabla periódica o la sistemática mineral. En biología las clases naturales serían las especies. (Que no deben confundirse con el taxon “clase” de la sistemática.) De la vigencia de esa corriente da fe el capítulo séptimo del libro de Craig Dilworth *The metaphysics of science. An account of modern science in terms of principles, laws and theories*.

En toda explicación de las clases naturales se sobreentiende algún tipo de esencialismo, es decir, el conceder un carácter sustantivo común a cuantos comparten determinadas condiciones necesarias y suficientes. Para ejemplificarlo, la escasa imaginación de los filósofos acude al manido ejemplo del oro: abundan los objetos de oro, pero en todos ese elemento posee determinado número atómico (determinado punto de fusión, conductividad, etcétera). En el número atómico (y en todas las demás propiedades distintivas), concluyen, reside la esencia del oro. La especie biológica se acomoda, *a fortiori*, a la noción de clase natural: todos los individuos de una comparten rasgos “esenciales” (los relacionados con las posibilidades de reproducción cruzada).

Craig encauza su explicación de las clases naturales a través de la distinción que establece entre esencia real y esencia nominal, que en biología correspondería con el genotipo y el fenotipo. El autor no sólo introduce el principio de evolución en la definición de clases naturales biológicas, sino que justifica la elaboración de clasificaciones jerárquicas. Cuáles sean éstas y los criterios por los que se guíen hallan explicación en otro capítulo de la filosofía de la biología, la teoría de la sistemática.

A propósito de las clases naturales suele presentarse una objeción de cierto peso: no parece que podamos equiparar las condiciones en virtud de las cuales el oro constituye una clase y las condiciones en virtud de las cuales se es un ratón doméstico. Craig admite la dificultad y la resuelve así: en el oro, la esencia real es su esencia nominal, es decir, el oro sólo consta de átomos de oro. Los organismos, por contra, poseen, además de dotación genética, un fenotipo adquirido en el tiempo.

Admitir que las clases naturales biológicas difieren de las clases naturales inorgánicas no significa que no existan muchas zonas de la biología que no puedan reducirse a otras ciencias, la química o la física. El problema de la reducción es otra de las grandes cuestiones sobre las que se debate en filosofía de la biología. La bibliografía, abundantísima, halla un riguroso resumen en un reciente número de la *Révue Philosophique de Louvain*. En su planteamiento general, el reduccionismo niega la especificidad del quehacer biológico



2. Las orugas de Tyria jacobeae *han servido para un experimento reciente donde se ha confirmado experimentalmente el valor adaptativo del aposematismo y del comportamiento gregario*

(de sus procesos y sistemas), distinto del proceder de la química y la física. (En un planteamiento más ceñido, los filósofos de la biología inquieren también si la genética mendeliana o cuantitativa puede reducirse a la genética molecular.)

Los defensores de la autonomía de la biología suelen adoptar un reduccionismo ontológico. Por tal entienden que los componentes últimos de los sistemas biológicos son los mismos que integran el mundo inerte. Lo que caracteriza a la biología es la estructuración u organización de los seres vivos. A ello objetan los partidarios del reduccionismo a ultranza que nuestras limitaciones para conocer la complejidad característica de los organismos es sólo un factor temporal. Tarde o temprano llegaremos a desentrañar los últimos niveles físicos de su composición.

La disputa es tan vieja como la propia biología. Por eso, los reduccionistas tildan a los autonomistas de vitalistas, en tanto que, para los que creen en la independencia epistemológica de la biología, los reduccionistas caen en los errores mecanicistas del pasado. El mecanicista modela la ciencia de los organismos a imagen y semejanza de la física. Los animales son meras máquinas. Por su parte, el vitalista piensa que, para explicar el ser vivo, es necesario recurrir a conceptos y métodos específicos; habla de una "fuerza vital" que conferiría especificidad del ser vivo, irreductible a las propiedades de sus componentes físico-químicos. ¿Cabe una tercera vía?

Muchos se han esforzado por encontrarla. Entre ellos, Robert N. Brandon, quien ha abordado casi siempre en solitario los capítulos cruciales de la filosofía de la biología —naturaleza de la adaptación, teleología, estructura de la teoría de la selección natural y niveles de selección—, reflexiones que acaba de compilar en *Concepts and methods in evolutionary biology*. Brandon es un pensador inquieto, crítico ante las definiciones recibidas. Suya es, por ejemplo, a propósito de la persistencia del más apto, la noción de adaptabilidad, es decir, de la adaptación como tendencia más que como resultado fortuito.

Más cuestionada ha resultado su disquisición sobre la teleología. Puede admitirse, sostiene, que los fenómenos a explicar sean teleológicos, pero la explicación de los mismo debe ser enteramente mecanicista. Ante el problema de los niveles de selección, se apunta a lo que va siendo ahora opinión mayoritaria, la sincrética mencionada. La selección no actuaría sólo sobre los organismos de una población, sino también sobre niveles superiores (grupos) y sobre niveles inferiores (genes). Sin abandonar la evolución conjunta de organismos y entorno, nos hace aquí entrega de sus primeros pensamientos sobre el tema de las relaciones entre teoría y experimento en biología evolutiva.

Repasa los dos métodos tradicionales de vinculación de la teoría con el experimento: el inductivismo y el hipotético-deductivismo. Aduce el primero que los experimentos y las observaciones preceden a las hipótesis teoréticas, que las hipótesis sólo pueden esbozarse tras numerosas observaciones y experimentos sin sesgar. Hay una secuencia lineal temporal de experimento a hipótesis. El hipotético-deductivismo invierte ese orden temporal. Una vez generadas las hipótesis se infieren predicciones que nos permiten diseñar experimentos para someter a prueba las hipótesis. Ambos métodos son incompletos. El inductivismo no permite estructurar y orientar el experimento por hipótesis. El hipotético-deductivismo sí alumbra los experimentos a realizar, pero no dice nada sobre la generación de hipótesis. Brandon desarrolla una prolija combinación de esos dos enfoques.

Para ejemplificar cómo proceder, trae a colación la hipótesis según la cual la reproducción sexual es ventajosa en entornos heterogéneos. Con ese fin, podemos tomar algunos organismos que sean capaces de ambos tipos de reproducción (sexual y asexual), los manipulamos para que den descendencia de ambos tipos y luego colocamos esa descendencia mixta en un entorno heterogéneo; así podemos comparar su grado de adaptación o persistencia de los mejor adaptados. (Podía haber escogido ejemplos más ilustrativos de selección natural en operación, como el de los pinzones de los Galápagos.)

La manipulación experimental, sin embargo, admite grados en biología. Lo que en física sería normativo (control absoluto de los parámetros de presión, temperatura, etcétera), en biología puede resultar desaconsejable. Comparar el rendimiento reproductor de dos genotipos de una planta en condiciones de laboratorio donde la luz, temperatura, humedad y tipo de suelo están rígidamente controlados violenta el proceso que realmente se da en el campo. Existen también distintos grados de importancia en experimentación biológica: de nada sirven, admite Brandon, las observaciones de biología de poblaciones que no se sujeten a comprobaciones experimentales; pero eso es inviable, por contra, en paleontología y sistemática. (L. A.)

Pesquerías

Modelos

Scaling fisheries. The Science of Measuring the Effects of Fishing, 1855-1955, por T. D. Smith. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

"En 1864, el gobierno noruego pidió a Georg Ossian Sars, hijo de un pionero de la biología marina, Michael Sars, que determinase por qué las capturas de bacalao en las Lofoten fluctuaban tanto. (...) Veinte años después, Noruega había fundado una institución científica para estudiar los cambios que se producían en sus pesquerías, equipándola con un barco,

laboratorios y una planta de cultivo. Al fin del siglo, muchos otros países habían imitado el ejemplo noruego, y muchos de ellos unieron sus esfuerzos en una organización internacional de investigación pesquera en 1901. ¿Qué sucedía con las pesquerías para justificar la creación y el mantenimiento de programas de investigación nacionales e internacionales?"

Este párrafo, con que comienza el libro de Tim Smith, marca el objetivo del mismo: describir la evolución de la investigación pesquera en el siglo que va desde la primera definición de sobrepesca documentada, que se le ocurre a Cleghorn en 1854, hasta los modelos de producción pesquera que son todavía hoy la base del cálculo de cuotas de captura o de otros objetivos de gestión.

Tras una corta introducción donde se presentan ejemplos de las fluctuaciones que mostraron algunas especies de importancia comercial, el libro sigue cronológicamente el desarrollo de los métodos para medir el efecto de la pesca. El autor identifica un primer período, entre 1855 y 1890, en el que se plantea el estudio sistemático de las pesquerías, se definen las preguntas básicas que deberán contestarse en el futuro para poder predecir las capturas, y se fundan las primeras instituciones que llevarán a cabo esa tarea (todo ello en el momento en que la expedición del *Challenger* está dando la vuelta al mundo, y comprobará la homogeneidad en la composición del agua marina).

En 1902 se funda el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES). Hjort y Garstang liderarán, durante la primera década del siglo, los dos comités del ICES dedicados a desarrollar la ciencia pesquera. Tras la Primera Guerra Mundial, los datos estadísticos recogidos permitirán evaluar el aumento en abundancia de las especies explotadas. En los años veinte se demuestra que los peces de una población dada que nacen durante una temporada de puesta pueden ser identificados en la captura, y puede por tanto seguirse su paso por la pesquería. W. F. Thompson esboza los primeros "modelos" demográficos en la década siguiente. En 1937 se firman los primeros acuerdos para regular la actividad pesquera en el Mar del Norte.

Tras la segunda guerra mundial aparecen modelos de gestión según tres líneas diferentes: 1) modelos demográficos que permiten comparar el efecto de distintas estrategias de pesca, atendiendo a las edades en que comienza la explotación y la intensidad de ésta; 2) el intento de describir la relación entre el número de progenitores y el de sus descendientes, y 3) el intento de relacionar la biomasa explotable y el esfuerzo pesquero, supuesto que éste es la variable que controla el nivel de abundancia de la población. A modo de epílogo, se describe la Conferencia auspiciada por Naciones Unidas sobre la conservación de los recursos marinos renovables, en donde se intentó diseñar un programa de gestión de las pesquerías del planeta.

La pregunta del gobierno noruego a Sars hijo no ha sido contestada tras un siglo de investigación. "Lo que faltó (durante el primer siglo de trabajo) y falta todavía es la posibilidad de desarrollar y ejecutar un programa de investigación que sea independiente de las necesidades de gestión del momento, y de los proyectos personales de los distintos investigadores, de modo que pudiese plantearse la búsqueda de la causas que subyacen realmente a las fluctuaciones de las pesquerías."

El problema real consiste en que las pesquerías no se cierran en sí mismas, los individuos que componen las poblaciones explotadas no pueden considerarse máquinas fijas de generación de biomasa, y, sobre todo, como ya sabían Darwin y Huxley, la abundancia en número de estas poblaciones se define en un período muy corto al comienzo de su ciclo vital. El fracaso en la aplicación de los modelos que el autor describe a la pesquería de anchoveta del Pacífico suroccidental fue el aldabonazo que demostró que la investigación sobre las causas de las fluctuaciones en la abundancia de los recursos pesqueros debe realizarse a escala oceánica, y contemplar series históricas de más de cien años.

Entre las deficiencias que encuentro en este libro, se cuenta el que no se haya incluido una descripción somera de la evolución de la teoría ecológica; el que no se cite nada prácticamente de la dinámica de recursos litorales, y el que no se describan las contribuciones en este campo realizadas fuera del ámbito anglosajón, —particularmente por parte de los investigadores japoneses—, con la excepción de Volterra y Baranov.

Y una última nota: aunque se habla de la sardina del Golfo de Vizcaya, o de la merluza del Gran Sol, el único nombre de un español en el libro es el de Margalef, en la cita de presentación del capítulo 2. Cuando buenos ecólogos, trabajando multidisciplinarmente con buenos matemáticos y físicos se dediquen a la investigación pesquera, esa situación cambiará. Pero, dada la estructura actual de las instituciones responsables de la investigación pesquera en España, no parece probable que podamos contar con ello a corto plazo. (J. A. P.)

Palangres para la pesca de corvina (según Sáez Reguart, 1791)

Ideas aplicadas

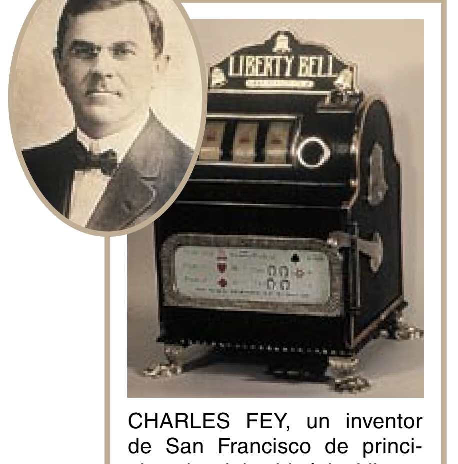
Raymond Heidel

Máquinas tragaperras

Los casinos acostumbran hacer negocios millonarios. De las ingentes sumas que ingresan, más de la mitad les llega a través de calderilla, la que entra en las máquinas tragaperras, artefactos de singular atracción. El conjunto de resortes, engranajes, palancas y contrapesos que el inventor Charles Fey encajó entre sí a principios de siglo para construir la Liberty Bell, que se convirtió en el modelo de la tragaperras de tres rodillos, ha ido dando paso a un conglomerado de microprocesadores y microcircuitos de memoria.

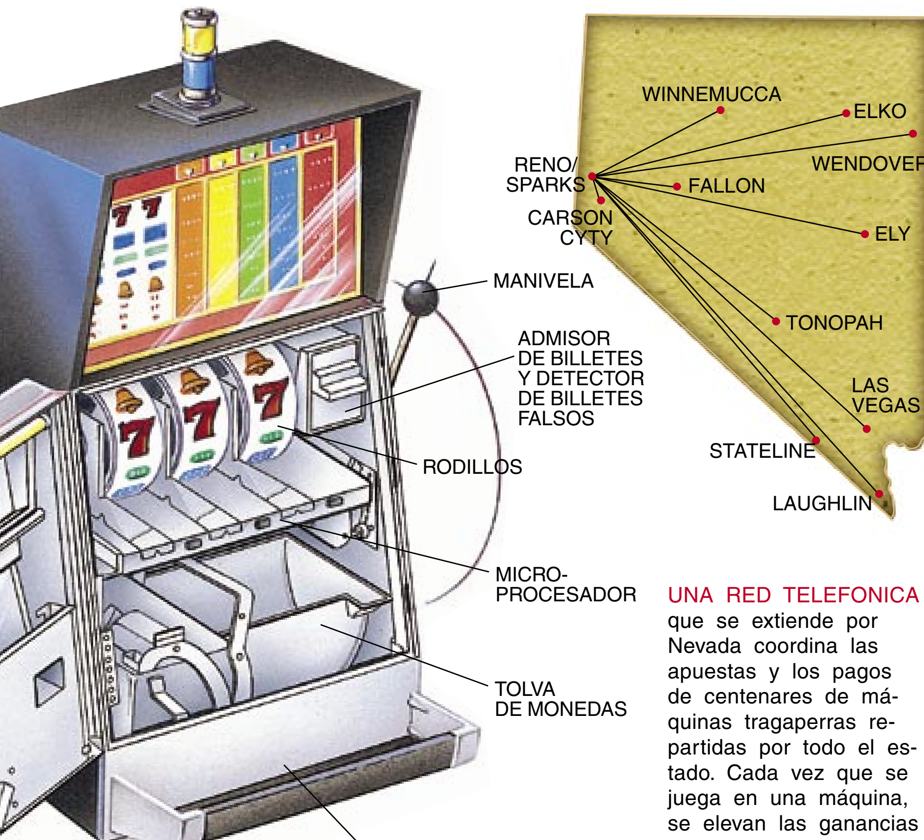
Cada rodillo puede detenerse en 22 posiciones (cada una representada por frutas, campanillas y otros símbolos o, simplemente, por un espacio en blanco), que dan un total de 10.648 combinaciones diferentes. Cuando las tragaperras eran máquinas puramente mecánicas, la probabilidad de premio máximo era así de 10.648 a uno. Pero el corazón de una máquina moderna es un microprocesador programado para generar números aleatorios, los cuales pueden asignarse a cualquier combinación de los rodillos. En realidad, el microprocesador dicta cuándo la máquina debe encenderse... y pagar. Como a cualquier combinación pueden asignarse pocos o muchos números aleatorios, los fabricantes de tragaperras pueden variar las probabilidades según deseen. Para el máximo premio, la probabilidad de sacar la única combinación exacta puede ajustarse a una sobre diez millones.

RAYMOND HEIDEL es vicepresidente de ingeniería de Bally Gaming de Las Vegas (Nevada).



CHARLES FEY, un inventor de San Francisco de principios de siglo, ideó la Liberty Bell, primera máquina tragaperras de tres rodillos que pagaba con monedas.

UN MICROPROCESADOR lanza una orden para que se inicie el giro de los tres rodillos. (En las tragaperras de vídeo, una imagen gráfica simula el movimiento de los rodillos.) Asimismo genera unos números aleatorios que se corresponden con combinaciones de los símbolos de los rodillos; por ejemplo, cerezas, barras o "premios gordos". Cuando el jugador gana, la tolva desencadena el runruneo de monedas.

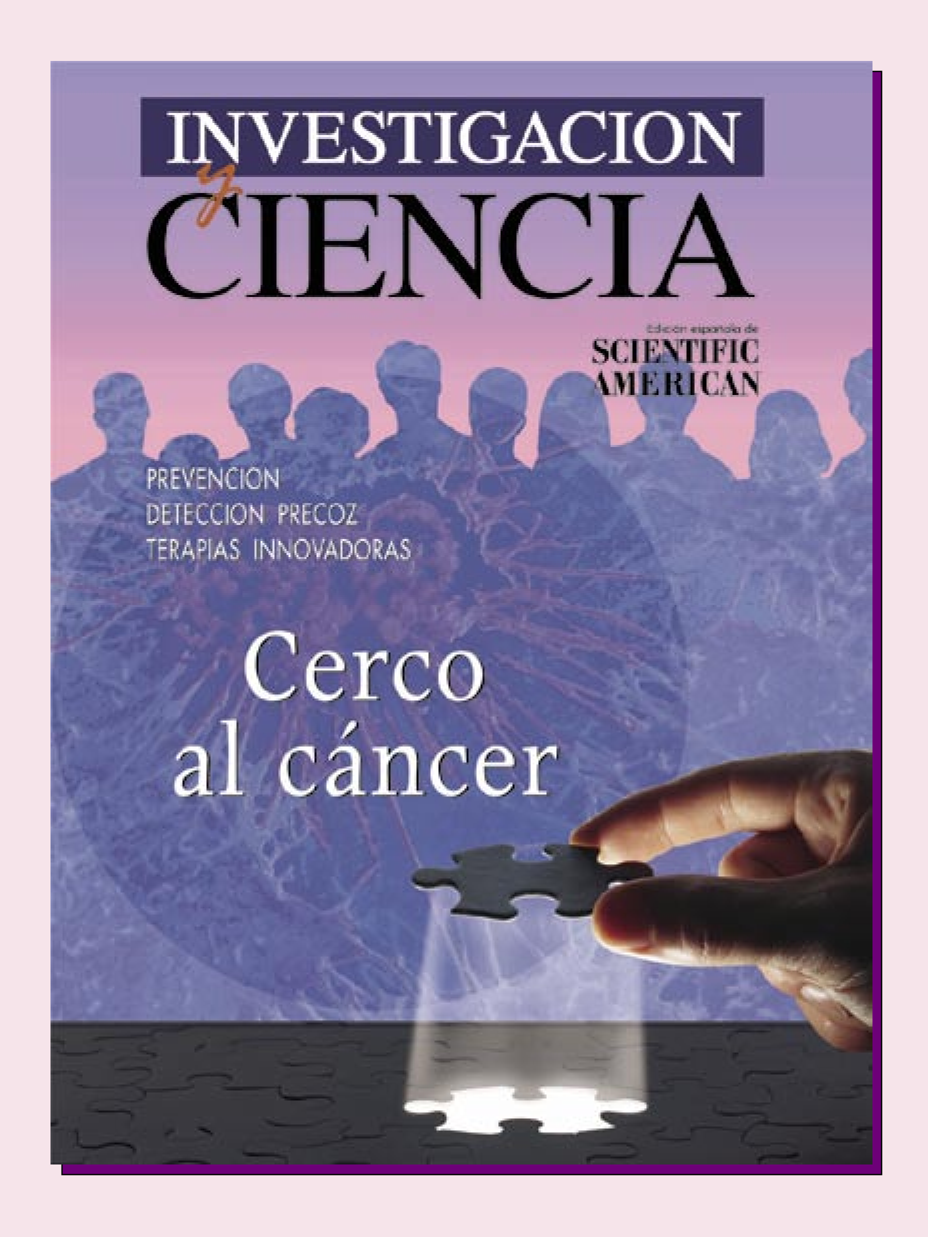


LAS MEDIDAS CONTRA LOS TIMOS incluyen sensores magnéticos y ópticos que examinan la autenticidad de monedas y billetes. Si alguien trata de retirar una moneda atada con un hilo, un sensor detecta el movimiento de retroceso y se dispara la alarma.

UNA RED TELEFONICA que se extiende por Nevada coordina las apuestas y los pagos de centenares de máquinas tragaperras repartidas por todo el estado. Cada vez que se juega en una máquina, se elevan las ganancias potenciales de sus premios mayores.

Número extraordinario y monográfico de noviembre

GENETICA Y MEDICINA CONTRA EL CANCER



A las técnicas tradicionales de intervención quirúrgica, radioterapia y quimioterapia se ha venido a sumar un arma poderosísima: la manipulación genética. El horizonte de la curación aparece más cercano.